

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**ESTUDO E OPTIMIZAÇÃO DO CORTE LASER DE ALTA
VELOCIDADE EM CHAPA METÁLICA FINA**

Tiago Maria Carvalho Cunha de Brito e Faro

Licenciado em Engenharia Mecânica
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre
em
Engenharia Mecânica
(Área de especialização em Materiais e Processos de Fabrico)

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor António Augusto Fernandes
Professora Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Porto, Junho de 2006

Resumo:

Este trabalho visa o estudo e a caracterização do corte laser de alta velocidade, nomeadamente, a influência do plasma na velocidade máxima alcançada utilizável em condições industriais e na qualidade da superfície de corte. Procurou-se correlacionar a irradiância do plasma com alguns parâmetros operatórios, tais como a posição do ponto focal, o tipo de gás de assistência e a velocidade de corte. O estudo foi desenvolvido para o corte de aço não ligado, aço inoxidável e alumínio em espessuras de 1 e 2mm, utilizando azoto, árgon e oxigénio como gases de assistência. Conclui-se que existe uma alteração no mecanismo de corte para velocidades elevadas em que a fonte de energia passa a ser o plasma proveniente da ionização do gás e do metal evaporado. Por outro lado, a correlação estabelecida entre a irradiância do plasma e a qualidade do corte obtido, permite actuar no controle do processo, sendo particularmente pertinente para o desenvolvimento de equipamentos de corte de alta velocidade para chapa fina. O corte de alta velocidade abre novas perspectivas para o corte de chapa fina devido às elevadas velocidades e baixos custos de processamento.

Abstract:

This work aims to study and characterize the high speed laser cutting, namely, the influence of the plasma plume on the maximum speed attainable in industrial conditions and the quality of the cut. An attempt to establish a correlation between the plasma irradiance, the focal point position, the assist gas type and the cutting speed was made. Materials under study were mild steel, stainless steel and aluminium in thicknesses of 1 and 2 mm. Assist gases were nitrogen, argon and oxygen.

From this study, it can be concluded that there is a modification in laser cutting mechanism for high travel speeds. At high speed laser cutting, the plasma produced acts as an additional power source. The correlation established between the plasma irradiance and the cut quality allows to control the process, which is particularly important for the development of manipulation systems for high speed laser cutting of thin sheets. This type of cut opens new perspectives for the thin plate cutting since it is much faster and economical.

Prefácio:

O corte por laser é uma tecnologia cada vez mais vulgar na indústria, na medida em que o custo dos seus equipamentos tem vindo a descer em simultâneo com o aumento das suas capacidades. Por este motivo, os equipamentos de corte por laser tenderão a substituir, ou pelo menos complementar, outras tecnologias tais como o corte por plasma, o oxi-corte ou mesmo a punçonagem.

O aumento das capacidades dos equipamentos laser tem passado por um aumento contínuo da potência dos geradores, bem como uma melhoria do modo do feixe. Por outro lado, a maior disponibilidade de accionamentos cada vez mais velozes, tem exigido dos fabricantes um esforço no sentido do aumento da rigidez das estruturas de forma a poderem suportar eficazmente as elevadas capacidades dinâmicas destes equipamentos. O recurso cada vez mais frequente a motores lineares nos sistemas de movimentação é a prova disso mesmo.

A melhoria da qualidade do feixe e o aumento da potência dos geradores laser abriu as portas ao designado “corte laser de alta velocidade”, objecto de estudo deste trabalho. Este tipo de corte permite aumentar muito a velocidade de corte, usando menor caudal do gás de assistência.

A velocidade de corte e o caudal de gás são de primordial importância no custo final de processamento, que por sua vez é o factor determinante da competitividade de um equipamento, pelo que se justifica assim a importância deste trabalho.

Os meus agradecimentos a todas as pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Gostaria de referir a disponibilidade e inestimável ajuda prestada pelo orientador desta tese na pessoa do Professor Doutor António Augusto Fernandes e da co-orientadora na pessoa da Professora Doutora Rosa Miranda.

Um especial agradecimento também à empresa A.Dias Ramos-Máquinas Ferramenta, Lda., patrocinadora deste trabalho, em particular à sua Administração e Direcção Geral pelos meios que me facultaram para a sua elaboração, nomeadamente na utilização do equipamento para a experimentação. Uma referência particular ao meu colega Engº Sérgio Rodrigues, cuja colaboração foi fundamental na instrumentação e aquisição dos resultados experimentais.

Agradeço à empresa AIR LIQUIDE, em particular ao Engº Francisco Completo, pela cedência de um dos gases utilizados neste trabalho.

Agradeço ainda às empresas Lasindústria, Ltd. e Custódio Castro Lobo & Filhos, Ltd. por facultarem dados actuais sobre os custos operatórios de equipamentos de corte por jacto de água e por plasma.

Índice:

Resumo:	iii
Abstract:	v
Prefácio:	vii
Índice:	ix
Lista de figuras:	xiii
Lista de tabelas:	xvii
Nomenclatura:	xix
1. Capítulo I – Objectivos.....	1
2. Capítulo II – Corte por laser	3
2.1. Introdução histórica ao corte por laser	3
2.2. Evoluções recentes de sistemas de corte por laser	6
2.2.1 Sistemas de movimentação.....	6
2.2.1.1. Máquinas de processamento bi-dimensional	6
2.2.1.2. Máquinas de 5 eixos para processamento tri-dimensional.....	8
2.2.1.3. Máquinas combinadas.....	9
2.2.1.4. Accionamentos.....	10
2.2.2 Fontes laser	11
2.2.2.1. Lasers de gás	12
2.2.2.2. Lasers de estado sólido	18
2.2.3 Sistemas de análise	26
2.2.4 Sistemas de automatização de tarefas.....	27
2.2.4.1. Manuseamento de chapa	27
2.2.4.2. Sistemas de automatização de tarefas	28
2.3. Mecanismos do corte por laser	28
2.3.1 Corte por vaporização.....	28
2.3.2 Corte por fusão	29
2.3.3 Corte por fusão reactiva.....	30
2.3.4 Corte frio	30
2.3.5 Oxi-corte assistido por laser (processo LASOX)	31
2.4. Caracterização física do plasma induzido por laser.....	31
2.4.1 Definição de plasma induzido por laser	31
2.4.2 Mecanismo de formação do plasma induzido por laser	32

2.4.2.1.	As fases transientes e os mecanismos de propagação.....	32
2.4.3	Caracterização do plasma induzido por laser	36
2.5.	A influência do plasma no corte por laser	36
3.	Capítulo III – Experimentação	43
3.1.	Materiais utilizados.....	43
3.2.	Equipamento utilizado.....	44
3.3.	Plano experimental realizado.....	49
3.3.1	Condições iniciais de ensaio.....	50
3.3.2	Primeira fase de ensaios - Caracterização da interacção entre irradiância do plasma, velocidade e posição do ponto focal	58
3.3.3	Segunda fase de ensaios - Optimização do corte com plasma em condições industriais	60
3.3.4	Análise das superfícies de corte.....	61
4.	Capítulo IV – Resultados e discussão	63
4.1.	Primeira fase de ensaios - Caracterização da interacção entre irradiância do plasma, velocidade e posição do ponto focal.	64
4.1.1	Ensaio em aço não ligado DC03 (EN 10130).....	64
4.1.1.1.	Espessura de 1mm , com Azoto	64
4.1.1.2.	Espessura de 1 mm, com Oxigénio	67
4.1.1.3.	Espessura de 1 mm, com Árgon.....	70
4.1.1.4.	Espessura de 2 mm, com Azoto	72
4.1.1.5.	Espessura de 2 mm, com Oxigénio	75
4.1.2	Ensaio em Alumínio AISI 5754.....	77
4.1.2.1.	Espessura de 1 mm, com Azoto	77
4.1.2.2.	Espessura de 1 mm, com Oxigénio	79
4.1.2.3.	Espessura de 2 mm, com Azoto	82
4.1.2.4.	Espessura de 2 mm, com Oxigénio	83
4.1.3	Conclusões sobre os resultados da primeira fase de ensaios	85
4.2.	Segunda fase de ensaios - Optimização do corte.....	88
4.2.1	Ensaio em aço não ligado DC03 (EN10130).....	91
4.2.1.1.	Espessura de 1mm, com azoto	91
4.2.1.2.	Espessura de 1mm, com oxigénio	92
4.2.1.3.	Espessura de 2mm, com azoto	94
4.2.1.4.	Espessura de 2mm, com oxigénio.....	96

4.2.2	Ensaaios em aço inoxidável AISI 304.....	98
4.2.2.1.	Espessura de 1mm, com azoto	98
4.2.2.2.	Espessura de 2mm, com azoto	99
4.2.3	Ensaaios em alumínio AISI 5754.....	102
4.2.3.1.	Espessura de 1mm, com azoto	102
4.2.3.2.	Espessura de 2mm, com azoto	104
4.2.3.3.	Espessura de 1mm, com oxigénio.....	105
4.2.3.4.	Espessura de 2mm, com oxigénio.....	107
4.2.4	Análise da qualidade do corte.....	108
4.2.5	Análise da eficiência do corte.....	113
4.2.6	Conclusões sobre a segunda fase de ensaios	115
5.	Capítulo V – Análise económica.....	119
5.1.	Análise económica comparativa entre o corte laser de alta velocidade e o corte laser convencional	119
5.2.	Análise económica comparativa entre o corte laser de alta velocidade e outros processos de corte.....	122
6.	Capítulo VI – Conclusões finais e sugestões para trabalho futuro.....	125
7.	Anexos.....	127
7.1.	Listagem dos programas executados	127
8.	Referências	131

Lista de figuras:

Fig. 1 - Vendas mundiais de equipamento laser (excluindo lasers de díodos), por tipo de aplicação [3]	4
Fig. 2 – Volume mundial de negócios de venda de equipamentos laser (excluindo lasers de díodos), por tipo de aplicação [3]	4
Fig. 3 – Volume mundial de negócios de venda de equipamento laser por tipo de laser (excluindo lasers de díodos) [3]	5
Fig. 4 - Vendas mundiais de equipamentos lasers por tipo de laser (excluindo lasers de díodos) [3]	5
Fig. 5 - Vendas mundiais de lasers para processamento de materiais [3, 4]	6
Fig. 6 – Estrutura de óptica fixa	7
Fig. 7 - Cabeça de corte da máquina "Sincrono" (Prima Industrie)	8
Fig. 8 – Máquina de corte por laser com duas cabeças (Trumpf)	8
Fig. 9 – Estrutura tipo “consola” (Trumpf)	9
Fig. 10 – Estrutura do tipo “pórtico”	9
Fig. 11 – Máquina combinada com punçõnagem e corte por laser (Finn-Power).....	10
Fig. 12 – Esquema ilustrativo de um laser simples de corrente contínua (PRC)	14
Fig. 13 – Gerador de fluxo axial rápido com turbina radial [9].....	15
Fig. 14 – Gerador de fluxo transversal [6]	16
Fig. 15 - Princípio de funcionamento de um laser do tipo slab (Rofin Sinar).....	16
Fig. 16 – Laser tipo slab com cavidade cilíndrica [10]	17
Fig. 17- Laser de Nd:YAG excitado por díodos (Rofin Sinar)	19
Fig. 18 - Laser de disco de Yb:YAG (Rofin Sinar).....	20
Fig. 19 - Laser de Yb:YAG com vários discos e díodos de bombeamento (Trumpf)....	21
Fig. 20 - Esquema de uma fibra "dual-core"	22
Fig. 21 – Distribuição do índice de refração das várias camadas de uma fibra óptica .	22
Fig. 22 - Corte de chapa de 3mm, com laser de fibras (Alabama Laser)	24
Fig. 23 - Princípio de funcionamento de um laser de díodo [7]	25
Fig. 24 - Máquina de corte laser com sistema de carga, descarga e armazém automático (Adira)	28
Fig. 25 – Efeito fotoelétrico	33
Fig. 26 – Corte convencional vs Corte de alta velocidade [1].....	39
Fig. 27 – Mecanismo do corte de alta velocidade [1].....	40

Fig. 28 – Formação do “keyhole” em corte de alta velocidade [1]	40
Fig. 29 – Centro de corte por laser CCL3015 do fabricante português Adira.....	45
Fig. 30 – Aspecto geral do gerador slab DC035 do fabricante Rofin Sinar	45
Fig. 31 – Impressão do modo do feixe em acrílico	45
Fig. 32 – Transformação da geometria do feixe laser	46
Fig. 33 – Esquema ilustrativo do mecanismo de detecção de plasma.....	46
Fig. 34 – Posição “zero” do ponto focal.....	47
Fig. 35 – Direcção dos eixos	48
Fig. 36 – Corte por fusão (a, b) vs corte por plasma (c, d).....	49
Fig. 37 – Mapa de influência de parâmetros na qualidade de corte [57].....	53
Fig. 38 - Mapa de influência de parâmetros na qualidade de corte [57]	53
Fig. 39 – Sensor capacitivo e peça cerâmica	55
Fig. 40 - Curva de calibração do sensor óptico de plasma	57
Fig. 41 - Esquema dos provetes de corte	60
Fig. 42 - Reflectividade vs comprimento de onda [27]	63
Fig. 43 - Coeficiente de absorção em função da temperatura, em atmosfera de argon [65]	63
Fig. 44 – Macrografias da superfície de corte (160x).....	64
Fig. 45 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	66
Fig. 46 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo	66
Fig. 47 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	68
Fig. 48 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo	69
Fig. 49 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo	71
Fig. 50 – Corte de alta velocidade de aço não ligado com Ar.....	71
Fig. 51 - Evolução do “stand-off” com o tempo	72
Fig. 52 – Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	74
Fig. 53 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo	74
Fig. 54 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	75
Fig. 55 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo	76

Fig. 56 – Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal	78
Fig. 57 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo	78
Fig. 58 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	80
Fig. 59 – Evolução da irradiância do plasma com o tempo.....	80
Fig. 60 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	82
Fig. 61 – Evolução da irradiância do plasma com o tempo.....	83
Fig. 62 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas	84
Fig. 63 – Evolução da irradiância do plasma com o tempo.....	85
Fig. 64 – Evolução da irradiância no corte de provetes de aço não ligado	92
Fig. 65 – Evolução da irradiância no corte de provetes de aço não ligado	94
Fig. 66 – Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”	94
Fig. 67 – Evolução da irradiância do plasma no corte de provetes de aço não ligado ...	96
Fig. 68 – Evolução da irradiância do plasma no corte de provetes de aço não ligado ...	97
Fig. 69 – Evolução da irradiância do plasma em corte de provetes de aço inoxidável ..	99
Fig. 70 – Evolução da irradiância do plasma em corte de provetes de aço inoxidável	101
Fig. 71 - Material: aço inoxidável AISI 304; Espessura: 2mm; Gás: N ₂	101
Fig. 72 – Evolução da irradiância do plasma em de provetes de alumínio	103
Fig. 73 – Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”	103
Fig. 74 - Evolução da irradiância para corte de provetes de alumínio	105
Fig. 75 – Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”	105
Fig. 76 – Evolução da irradiância em corte de provetes de alumínio.....	106
Fig. 77 - Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”	107
Fig. 78 – Evolução da irradiância com o tempo	108
Fig. 79 – Superfície de corte.....	109
Fig. 80 – Superfície de corte.....	109
Fig. 81 – Superfície de corte.....	110
Fig. 82 – Superfície de corte.....	110
Fig. 83 – Superfície de corte.....	111
Fig. 84 – Superfície de corte.....	112
Fig. 85 – Superfície de corte.....	112

Fig. 86 – Superfície de corte.....	113
Fig. 87 - Análise da eficiência do corte de aço não ligado.....	114
Fig. 88 - Parcelas de custo no corte laser de alta velocidade.....	120
Fig. 89 - Parcelas de custo no corte por fusão reactiva de aço não ligado, em espessura de 1mm [69]	121
Fig. 90 - Parcelas de custo de corte por fusão de aço não ligado, em espessura de 1mm [69]	121
Fig. 91 – Comparativo de custos entre vários processos de corte laser.....	122
Fig. 92 – Comparativo de custos entre vários processos de corte	123

Lista de tabelas:

Tabela 1 - Energias de ionização [33]	33
Tabela 2 - Características gerais do equipamento	48
Tabela 3 - Parâmetros de corte iniciais.....	50
Tabela 4 – Parâmetros de corte laser com N ₂ para o aço não ligado	65
Tabela 5 – Parâmetros de corte para aço não ligado com N ₂	73
Tabela 6 - Parâmetros de corte de alumínio AISI 5754 com N ₂	77
Tabela 7 - Parâmetros de corte de alumínio AISI 5754 com N ₂	82
Tabela 8 - Parâmetros de corte de alumínio AISI 5754 com O ₂	84
Tabela 9 - Parâmetros seleccionados para a segunda fase de ensaios	90
Tabela 10 – Parâmetros de corte de provetes de aço não ligado, com N ₂	91
Tabela 11 - Qualidade do corte de provetes de aço não ligado DC03, com N ₂	92
Tabela 12 – Resultados de corte de provetes de aço não ligado DC03, com O ₂	93
Tabela 13 – Parâmetros de corte de provetes de aço não ligado, com N ₂	95
Tabela 14 – Resultados do corte de provetes de aço não ligado DC03, com N ₂	95
Tabela 15 – Resultados de corte de provetes de aço não ligado DC03, com O ₂	96
Tabela 16 – Parâmetros de corte de provetes de aço inoxidável, com N ₂	98
Tabela 17 – Resultados de corte de provetes de aço inoxidável AISI 304, com N ₂	98
Tabela 18 – Parâmetros de corte de provetes de aço inoxidável, com N ₂	100
Tabela 19 - Resultados de corte de aço inoxidável AISI 304 com N ₂	100
Tabela 20 – Parâmetros de corte de provetes de alumínio, com N ₂	102
Tabela 21 – Resultados de corte de provetes de alumínio AISI 5754, com N ₂	102
Tabela 22 – Parâmetros de corte de provetes de alumínio, com N ₂	104
Tabela 23 - Resultados de corte de provetes de alumínio AISI 5754, com N ₂	104
Tabela 24 - Resultados de corte de alumínio AISI 5754 com O ₂	106
Tabela 25 – Resultados de corte para alumínio AISI 5754 com O ₂	108
Tabela 26 – Custos de processamento no corte laser com plasma [69]	119
Tabela 27 – Custos de processamento no corte convencional [69].....	120
Tabela 28 – Custos de processamento no corte por jacto de água	122
Tabela 29 – Custos de processamento no corte por plasma	123

Nomenclatura:

a - aceleração (em % de 2.g)

cw – feixe emitido em modo contínuo

I_p – índice de plasma, em Volt, obtido por leitura directa do sensor óptico de plasma

$Jerk$ – Derivada da função aceleração em ordem ao tempo ($\frac{\partial a}{\partial t}$)

N_2 – azoto

O_2 - oxigénio

p – pressão do gás de assistência

P – potência do feixe laser

P_p – índice de plasma a partir do qual a máquina se imobiliza

P_r – índice de plasma para o qual existe redução de velocidade

P_v – % de redução de velocidade quando o índice de plasma é igual a P_r

$p.p.f.$ – posição do ponto focal

$stand-off$ – distância do bico de corte à chapa

v – velocidade de corte

1. Capítulo I – Objectivos

A tecnologia laser teve o seu início, em termos industriais, nos anos 70 e nas últimas décadas, o corte por laser tem sofrido um forte desenvolvimento em três vertentes fundamentais ligadas:

- ao equipamento: no desenvolvimento de novos lasers, de lasers mais potentes e de melhor modo de feixe;
- ao desenvolvimento dos processos de transformação de materiais, no sentido de compreender melhor estes processos e optimizá-los.
- ao desenvolvimento de sistemas de movimentação e controle, no sentido de aumentar a produtividade dos equipamentos.

O corte por laser foi a primeira aplicação industrial destes equipamentos e continua a ser a mais utilizada, estimando-se que cerca de 60% das aplicações industriais dos lasers se situem nesta área. Numerosos trabalhos de investigação fundamental e aplicada têm sido realizados neste domínio.

Preißig *et al* [1] estudaram o efeito do plasma no corte por laser de CO₂ evidenciando que o plasma formado na zona de interacção constitui uma fonte adicional de energia para o corte, permitindo aumentar muito significativamente a velocidade.

Surge assim, o corte de alta velocidade de chapa metálica fina, em que para o exemplo do aço não ligado, as velocidades de corte atingem valores da ordem dos 20 m/min, com lasers de CO₂ de alta potência e modo de feixe gaussiano.

Este novo tipo de corte, coloca desafios aos fabricantes de equipamento no sentido de desenvolverem sistemas mais robustos e rígidos, capazes de suportar eficazmente as solicitações dinâmicas a que estes equipamentos estão sujeitos.

Neste trabalho, foi estudado o corte de alta velocidade em diversos materiais e condições industriais. Dada a distância temporal que existe entre os dois trabalhos, e como tal, a diferença de equipamentos disponíveis, foi possível estender o estudo a outros materiais e actualizar o campo de aplicação deste tipo de corte. Procurou relacionar-se a irradiância do plasma com a velocidade de corte máxima e a qualidade de corte, usando uma metodologia semelhante à usada por Tönshoff *et al* [2]. Usando um foto-detector incorporado na cabeça de corte, foi caracterizada a irradiância do

OBJECTIVOS

plasma e foram determinadas as velocidades óptimas de corte, para cada material e espessura. Foi ainda analisada a influência do gás e da posição do ponto focal na velocidade de corte e na qualidade da superfície obtida.

2. Capítulo II – Corte por laser

2.1. *Introdução histórica ao corte por laser*

Laser é o acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Laser é luz com características especiais. Em 1704, Newton caracterizou a luz como uma corrente de partículas. Em 1803, com a experiência de interferência de Young e com a descoberta da polaridade da luz, os cientistas da altura estabeleceram o comportamento ondulatório da luz. A teoria electromagnética de Maxwell explicou a luz como sendo vibrações rápidas de um campo electromagnético devido a oscilações de partículas carregadas. Na viragem do século XX, o fenómeno da radiação do corpo negro colocou em cheque a teoria de Maxwell. Segundo esta teoria, o corpo negro teria uma energia infinita. Foi com Planck e os conceitos de mecânica quântica que esta questão foi explicada. Einstein propôs o conceito de fóton. Pode-se dizer que a luz é composta por partículas individuais chamadas fótons, que possuem uma quantidade discreta de energia. Einstein previu, em 1917, que quando existisse inversão de população entre os níveis de energia superior e inferior, seria possível realizar radiação estimulada amplificada, isto é, radiação laser.

O primeiro laser foi inventado por Maiman em 1960. Era um gerador de estado sólido, mais propriamente de rubi e desde então a evolução tem sido contínua. Actualmente existem lasers de estado sólido, gasoso e líquido, cada qual com as suas características que justificam a sua aplicação para determinado fim. O campo de utilização dos vários tipos de laser é vastíssimo englobando aplicações tais como o processamento de materiais, aplicações médico-terapêuticas, instrumentação, processamento de imagem, lazer, etc.

Em termos de aplicações no mercado actual, o processamento de materiais é o mais importante pois representa o maior volume de negócios (Fig. 1 e Fig. 2).

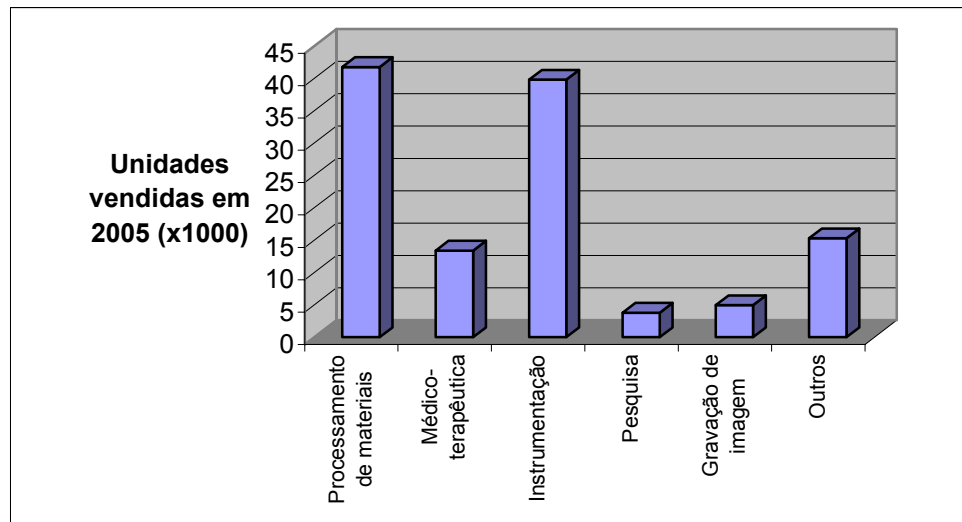


Fig. 1 - Vendas mundiais de equipamento laser (excluindo lasers de díodos), por tipo de aplicação [3]

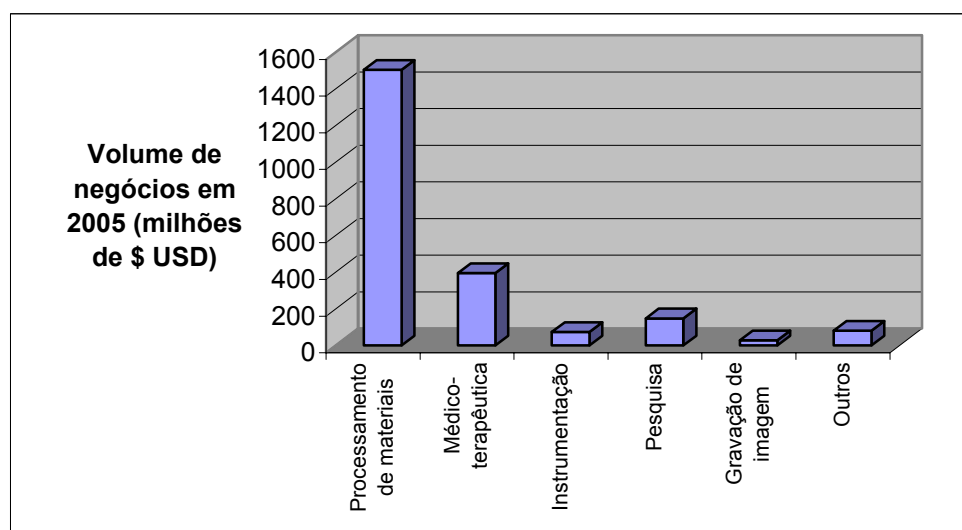


Fig. 2 – Volume mundial de negócios de venda de equipamentos laser (excluindo lasers de díodos), por tipo de aplicação [3]

De entre os vários lasers, considerados nas figuras, os lasers de CO₂ e os de estado sólido são os mais importantes e constituem a grande parte do volume de negócios (Fig. 3 e Fig. 4).

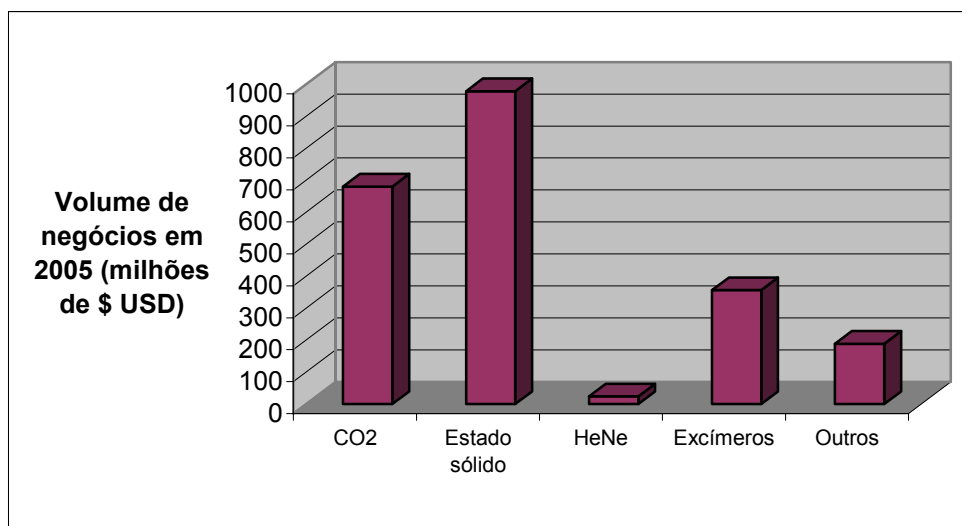


Fig. 3 – Volume mundial de negócios de venda de equipamento laser por tipo de laser (excluindo lasers de díodos) [3]

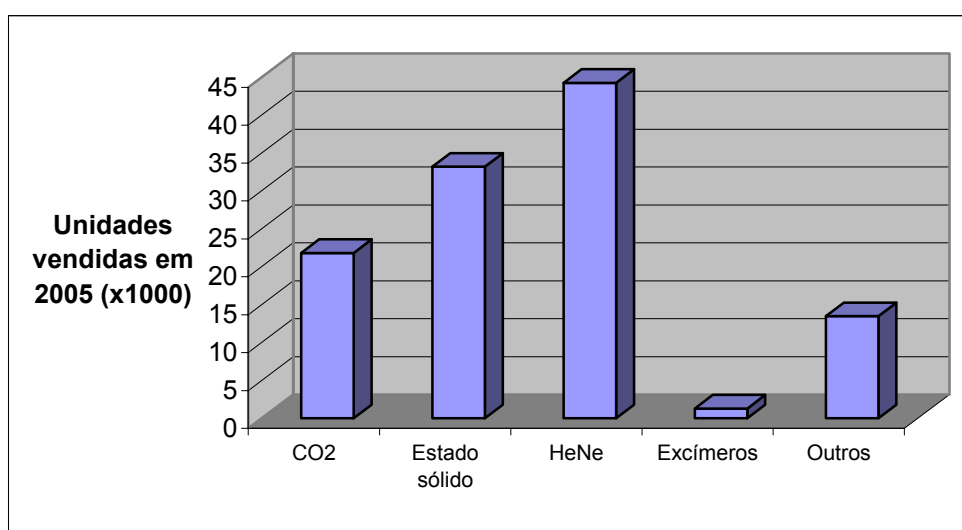


Fig. 4 - Vendas mundiais de equipamentos lasers por tipo de laser (excluindo lasers de díodos) [3]

No campo do processamento de materiais por laser, os lasers de CO₂ são os mais utilizados (ver Fig. 5). As previsões para 2006, indicam um crescimento de 6% em termos de número de unidades. Os lasers de fibras, embora ainda tenham um campo de aplicação restrito prevê-se que tenham um crescimento da ordem dos 33%. Em relação aos lasers de estado sólido, prevê-se um crescimento negativo de 5% [3]. Os lasers de díodos têm um crescimento previsto de 21% [4].

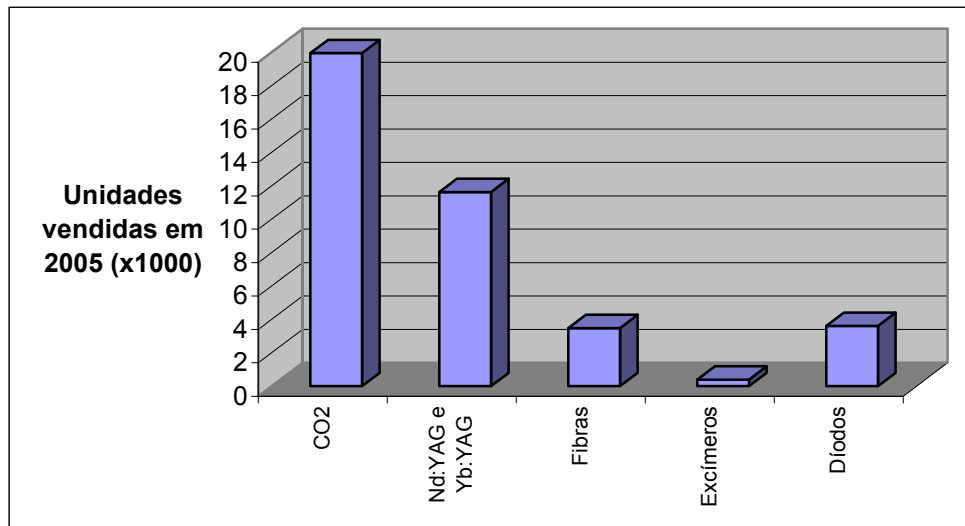


Fig. 5 - Vendas mundiais de lasers para processamento de materiais [3, 4]

2.2. *Evoluções recentes de sistemas de corte por laser*

Os equipamentos de corte por laser têm sofrido evoluções em vários aspectos. No campo da potência, o crescimento tem sido contínuo, sendo hoje possível encontrar no mercado, por exemplo, máquinas de corte por laser equipadas com geradores de CO₂ com potência de 6 kW. Com o objectivo de aumentar a performance, os sistemas de movimentação têm sofrido melhorias ao nível da rigidez e dos accionamentos usados, permitindo maiores velocidades e acelerações. No campo da automação, é vulgar encontrar hoje em dia o posicionamento automático do ponto focal, a regulação automática da pressão, a monitorização do processo em tempo real, etc. Alguns equipamentos propõem níveis de automação ainda mais evoluídos, tais como troca automática da cabeça de corte, troca e centramento automático do bico de corte.

2.2.1 Sistemas de movimentação

As máquinas de corte por laser actualmente disponíveis podem processar peças bidimensionais ou tridimensionais, dependendo do número de eixos.

2.2.1.1. *Máquinas de processamento bi-dimensional*

As máquinas de corte por laser bidimensionais, podem ser classificadas quanto ao movimento da radiação em sistemas de ópticas móveis ou fixas, consoante exista ou

não, pelo menos, um componente óptico que se mova. As primeiras máquinas eram do tipo de óptica fixa, usando estruturas idênticas às das punçadoras (Fig. 6). Embora ainda exista um fabricante de equipamentos a propor máquinas com este tipo de concepção, este é já considerado obsoleto. Este tipo de concepção rapidamente originou o tipo híbrido, em que a chapa se move numa direcção e a cabeça move-se na direcção perpendicular. Ainda é possível encontrar máquinas com este tipo de concepção embora a utilização de chapas de maiores dimensões, condicione fortemente a dinâmica da máquina.

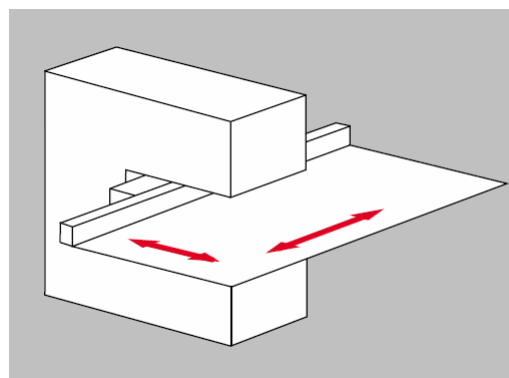


Fig. 6 – Estrutura de óptica fixa

A concepção estrutural mais actual é a do tipo de ópticas móveis (*“flying optics”*). Esta concepção permite a obtenção de um comportamento mais dinâmico, com maior aceleração e *“jerk”* (variação da aceleração com o tempo), pois a massa móvel é muito menor do que no caso do movimento da chapa. A crescente aceleração tem sido obtida à custa da utilização de motores mais potentes e massas cada vez mais reduzidas. Nos equipamentos mais actuais utilizam-se motores lineares para os accionamentos dos eixos. Alguns fabricantes utilizam motores lineares em todos os eixos, como por exemplo a Adira (em Portugal), a Amada (no Japão), a Balliu (na Bélgica), e a Finn-Power (na Finlândia).

Outros meios para conseguir aumentar a *“performance”* têm sido a incorporação de um ou dois eixos para provocar o movimento relativo da cabeça em relação ao pórtico. Esses dois eixos adicionais têm um curso pequeno e elevada aceleração, pois a massa da cabeça é muito reduzida. Neste campo, o equipamento mais actual é o modelo *“Sincrono”* do construtor italiano Prima Industrie, com aceleração de 6g nos dois eixos da cabeça (Fig. 7). Também o construtor alemão *“Trumpf”* tem utilizado esta técnica embora só com um eixo e uma aceleração muito mais baixa que o construtor italiano.

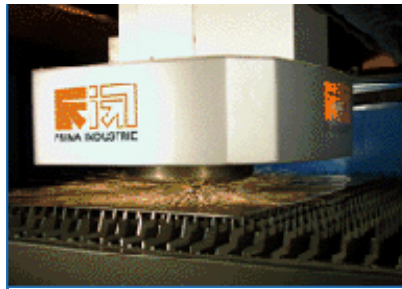


Fig. 7 - Cabeça de corte da máquina "Sincrono" (Prima Industrie)

Este construtor alemão é ainda pioneiro no desenvolvimento de máquinas de corte com duas cabeças. Estas máquinas são equipadas com motores lineares e particularmente vocacionadas para o corte de chapa fina (Fig. 8).



Fig. 8 – Máquina de corte por laser com duas cabeças (Trumpf)

2.2.1.2. Máquinas de 5 eixos para processamento tri-dimensional

O corte tridimensional tem grande aplicação na indústria automóvel e aeronáutica. Recentemente, a tecnologia de corte em cinco eixos tem sido também considerada como uma mais valia das tradicionais máquinas 2D. Em geral, a construção de uma máquina tridimensional “pura” tem uma estrutura do tipo “consola” (Fig. 9).

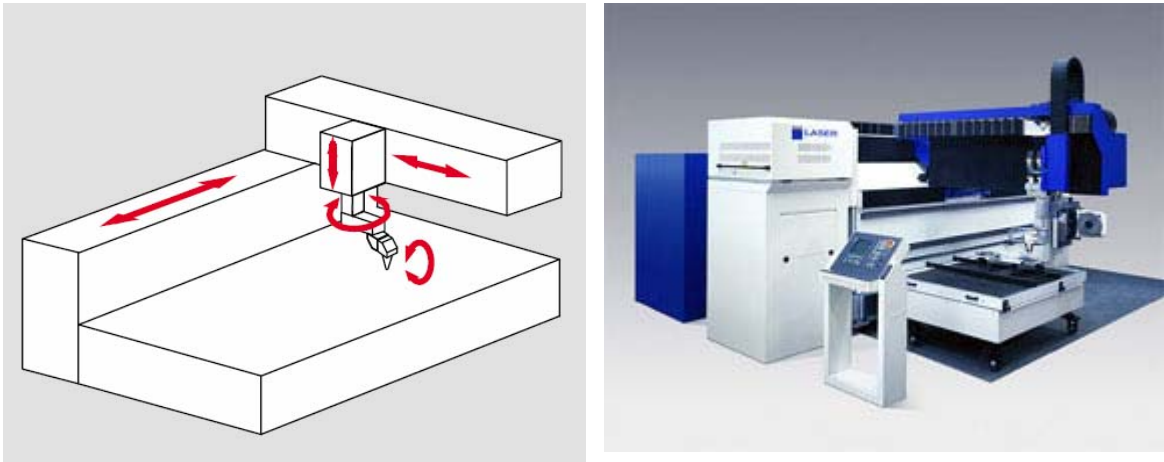


Fig. 9 – Estrutura tipo “consola” (Trumpf)

Outro tipo comum, é a estrutura do tipo “pórtico”, conforme mostrado na Fig. 10. Estas máquinas são vocacionadas para todo o tipo de corte tri-dimensional e podem ser adaptadas ao processo de soldadura bastando para isso fazer a troca de cabeça. Pela sua natureza construtiva são máquinas de baixa dinâmica.

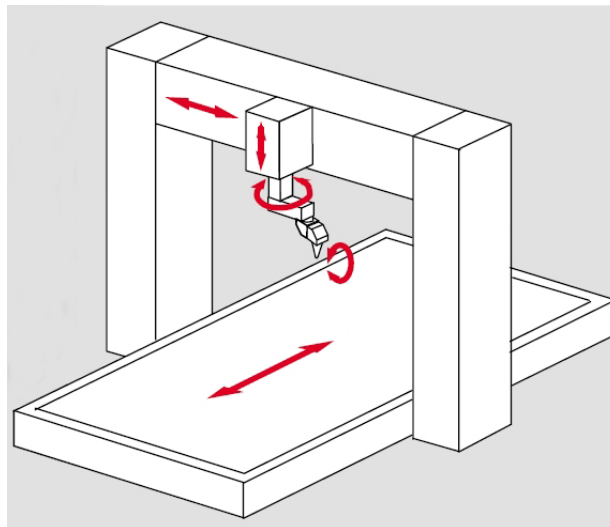


Fig. 10 – Estrutura do tipo “pórtico”

2.2.1.3. Máquinas combinadas

Uma tendência que se tem verificado nalguns mercados, sobretudo onde os custos de mão-de-obra são elevados, é a procura de soluções automáticas de elevada flexibilidade. Com o objectivo de reduzir os custos de logística, as máquinas

combinadas de corte integram diferentes tecnologias no mesmo equipamento. A combinação de tecnologias inclui sempre punçõagem juntamente com outra ou outras tecnologias, tais como o corte por guilhotina, corte por laser, corte por plasma, ou ainda furação, roscagem e escareamento. São equipamentos dispendiosos, com custo por peça elevado, cujo benefício está associado, essencialmente, à redução da logística envolvida para a produção da peça, quando esta tem operações diferentes que obriguem ao uso de várias máquinas. Na Fig. 11 apresenta-se uma máquina combinada.



Fig. 11 – Máquina combinada com punçõagem e corte por laser (Finn-Power)

2.2.1.4. Accionamentos

Um dos campos que tem sido alvo de melhoramentos consideráveis, permitindo a obtenção de elevadas velocidades e acelerações, é o dos accionamentos. A utilização de motores lineares em detrimento dos motores rotativos acoplados a fusos de esferas ou cremalheiras, é actualmente comum nos equipamentos de maior performance, sendo possível encontrar esse tipo de solução em construtores como Adira de Portugal, Amada do Japão, Balliu da Bélgica, Finn Power da Finlândia ou Trumpf da Alemanha. Esses equipamentos atingem velocidades máximas compreendidas entre 280 e 340 m/min e acelerações entre 2 e 4 g.

2.2.2 Fontes laser

Existem actualmente inúmeros tipos de fonte laser. Os lasers classificam-se quanto ao meio activo, em três grandes grupos: lasers de gás, lasers de estado líquido e lasers de estado sólido.

A variedade de comprimentos de onda, potências e qualidade do feixe é enorme, tornando o campo de aplicação dos lasers muito vasto. No entanto, no processamento de materiais, os tipos de fontes laser aplicáveis é restrito aos lasers de alta potência.

As fontes laser de elevada potência têm sido alvo de progressos notáveis a vários níveis. Existem, actualmente, algumas tecnologias concorrentes para as fontes de grande potência:

- Lasers de CO₂, bombeados por descarga eléctrica, os quais são descritos em 2.2.2.1, no ponto i;
- Laser de excímeros, os quais são apresentados em 2.2.2.1, no ponto ii;
- Lasers de Nd:YAG, do tipo varão, bombeados por lâmpadas ou por laser de díodos, os quais são descritos em 2.2.2.2, no ponto i;
- Lasers de Yb:YAG, do tipo disco, bombeados por lasers de díodos, os quais são apresentados em 2.2.2.2, no ponto ii;
- Lasers de fibras, os quais são apresentados em 2.2.2.2, no ponto iii;
- Lasers de díodos, para aplicação directa em soldadura, os quais são apresentados em 2.2.2.2, no ponto iv;

Os lasers de CO₂ são ainda actualmente os mais utilizados e os mais adequados ao processamento de materiais, em particular nas aplicações que exijam elevada densidade de potência, ou seja, feixes com elevada qualidade.

A qualidade de determinado feixe é um factor determinante na sua escolha para determinada aplicação. Existem vários números característicos para descrever a qualidade de um feixe, sendo os mais habituais: K, M² e BPP (“beam parameter product”). Estes números relacionam-se entre si. O número M² quantifica a qualidade do feixe, quando em presença de modos TEM_{mn}, relacionando os números inteiros *m* e *n* da seguinte forma:

$$M^2 = 2m + n + 1 \quad \text{Eq. 1}$$

Para um feixe com modo TEM₀₀, o número M² toma o valor 1, o qual traduz a máxima qualidade. O valor M permite relacionar o ângulo de divergência de um feixe com modo TEM de ordem superior com o ângulo de divergência de um feixe gaussiano, através da relação:

$$M = \frac{\Theta_{act}}{\Theta_{gauss}} \quad \text{Eq. 2}$$

em que Θ_{act} é o ângulo de divergência do feixe em causa e Θ_{gauss} é o ângulo de divergência do feixe gaussiano. O número K relaciona-se com M² da seguinte forma:

$$K = \frac{1}{M^2} \quad \text{Eq. 3}$$

O número BPP (“beam parameter product”) é dado pelo seguinte produto:

$$BPP = w_0 \cdot \Theta_0 \quad \text{Eq. 4}$$

Em que w_0 representa o diâmetro do laser no ponto focal e Θ_0 representa o ângulo de divergência do feixe em relação ao eixo óptico.

2.2.2.1. Lasers de gás

Os lasers de gás podem ser divididos segundo o tipo de gás lasante. Este pode ser de átomos neutros, iões ou moléculas. O laser de Helio-Neon é um exemplo de um laser de gás de átomos neutros e o laser de CO₂ é um exemplo de um laser de gás molecular. Neste capítulo vamos considerar os lasers de CO₂ e os de excímeros, com maior incidência nos primeiros, pois de todos os lasers de gás, esses são actualmente os mais importantes para o processamento de materiais.

i. Lasers de Dióxido de Carbono (CO₂)

O meio activo deste tipo de laser é composto por dióxido de carbono, hélio e azoto nas proporções aproximadas de 6, 10 e 84% respectivamente. O CO₂ é a espécie emissora de radiação, o N₂ ajuda a excitar as moléculas de CO₂ e o He é responsável simultaneamente pelo arrefecimento e pela manutenção da inversão de população. Os

lasers de CO₂ emitem num comprimento de onda de 10,6 μm . Actualmente a potência destes lasers varia tipicamente desde alguns watts até 25 kW. Excepcionalmente a potência pode chegar mesmo aos 100 kW. Robert Hull *et al* cortaram 50,8 mm de aço não ligado a 780 m/min com uma potência de 100 kW [5].

Este tipo de fontes pode ser classificado segundo o tipo de caminho óptico interno, o tipo de excitação e a forma de arrefecimento.

Em relação ao caminho óptico interno, existem dois tipos de geradores:

- opticamente estável;
- opticamente instável.

Quanto ao modo de excitação, pode ser feita por rádio-frequência ou por corrente contínua.

Em relação ao tipo de arrefecimento, os geradores podem ser de:

- fluxo lento
- fluxo axial rápido
- fluxo transversal
- tipo slab arrefecido por difusão

No que se refere ao caminho óptico, um gerador diz-se opticamente estável quando o feixe pode passar apenas por um espelho parcialmente transparente. Se uma cavidade ressonante com espelhos 100% reflectores tiver um desenho tal que o feixe é reflectido para o exterior da cavidade, então o gerador diz-se opticamente instável. Nestes casos, à saída, o feixe atravessa uma janela de diamante transparente à radiação. Em lasers de elevada potência e diâmetro de feixe pequeno, a estabilidade térmica de geradores com cavidade opticamente estável é mais difícil de assegurar devido à carga térmica sofrida pelo espelho parcialmente transmissivo. As cavidades opticamente instáveis não têm este problema, pois não há transmissão. Uma vantagem adicional é o facto de a geometria da cavidade poder ser facilmente adequada ao meio activo em causa. Uma desvantagem, é a sensibilidade deste tipo de lasers ao desalinhamento de qualquer componente óptico [6].

Em relação ao tipo excitação, a solução por corrente contínua ainda é a escolhida por alguns fabricantes. A excitação é provocada por uma descarga entre dois eléctrodos em contacto com o meio activo. Os geradores com este tipo de excitação podem ser produzidos de forma mais económica e têm uma eficiência razoável. A principal desvantagem prende-se com o desgaste dos eléctrodos que obrigam a intervenções

técnicas mais frequentes, sobretudo para potências elevadas. Na Fig. 12, é representado um esquema de um laser bombeado por corrente contínua.

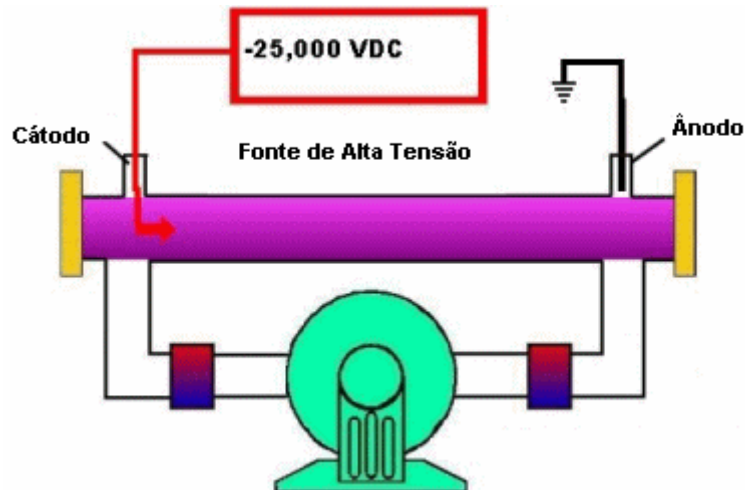


Fig. 12 – Esquema ilustrativo de um laser simples de corrente contínua (PRC)

O fabricante americano PRC é um exemplo onde ainda podem ser encontradas fontes laser excitadas por corrente contínua. No entanto, a maioria dos construtores de fontes laser opta pela excitação por radiofrequência, em particular para potências iguais ou superiores a 2kW, potência a partir da qual a manutenção necessária dos eléctrodos começa a ser mais importante. Outra vantagem importante da excitação por radiofrequência é a possibilidade de operação em modo pulsado de alta-frequência.

Quanto ao tipo de arrefecimento, como já se referiu existem 4 tipos. Nos geradores de fluxo lento, o arrefecimento dá-se pelas paredes da cavidade, que são arrefecidas por água. Estes lasers são caracterizados por ganhos relativamente baixos (cerca de 30 a 50 W/m) e por isso não têm potências superiores a 2kW [7, 8]. Nestes geradores, não existem turbinas pelo que a velocidade do fluxo é conseguida à custa da pressão imposta ao meio activo. Nos de fluxo axial rápido e nos de fluxo transversal, o gás tem a dupla missão de por um lado ser o meio activo e por outro lado arrefecer a cavidade. O arrefecimento é feito por convecção através do escoamento do gás no interior da cavidade. O que distingue estes dois tipos é a direcção do fluxo em relação à direcção do feixe. Nos de fluxo axial o gás flui no eixo principal do laser a uma velocidade entre 300 e 500 m/s, enquanto que nos de fluxo transversal, o escoamento é perpendicular ao eixo principal. Neste último tipo, o arrefecimento é mais eficiente que

nos de fluxo axial, por isso são usados em unidades compactas de potência elevada. Uma desvantagem é a menor qualidade do feixe em relação aos de fluxo axial rápido. Nestes o ganho é da ordem dos 500 W/m [8]. Nas Fig. 13 e Fig. 14 estão representados um gerador de fluxo axial rápido e um de fluxo transversal, respectivamente. Um dos principais desenvolvimentos que estes tipos de laser tem sofrido prende-se com o aumento da potência e a obtenção de modos com melhor qualidade. Nos lasers de fluxo axial rápido é possível encontrar, por exemplo no fabricante alemão Trumpf, uma potência de 7 kW com modo TEM_{01} e uma potência de 20 kW, com modo de baixa ordem. Em relação aos de fluxo transversal, encontramos no fabricante alemão Rofin Sinar, uma potência máxima de 8 kW, com um $K > 0,18$. No fabricante americano PRC, encontramos um laser de 7kW, excitado por corrente contínua. Este nível de potência permite o corte de espessuras até 30 mm em aço não ligado e 20 mm de aço inoxidável. O fabricante americano de equipamentos de corte por laser Whitney comercializa actualmente uma máquina com gerador PRC de 6 kW. Também o construtor Trumpf comercializa actualmente máquinas com potência de 6 kW.

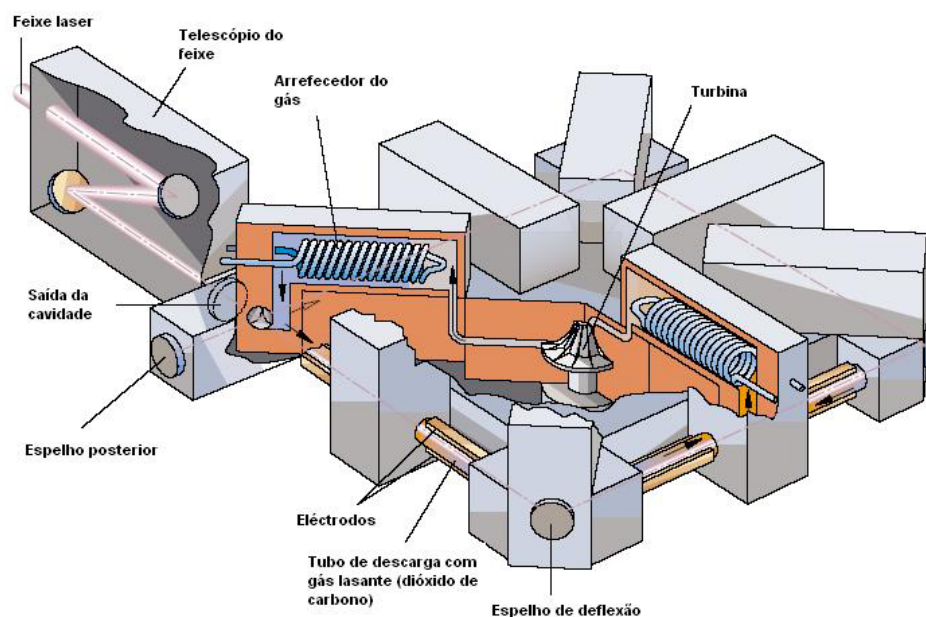


Fig. 13 – Gerador de fluxo axial rápido com turbina radial [9]

Um outro esforço que alguns fabricantes têm desenvolvido é no sentido de baixar os consumos de gases lasantes. Actualmente, ainda é vulgar encontrar consumos da ordem dos 30 a 50 l/h. O construtor japonês Mitsubishi anunciou um consumo muito

mais baixo, da ordem dos 3 l/h para um gerador de 4 kW. Neste sentido de poupança de gás lasante, nasceu o laser de CO₂ do tipo slab.

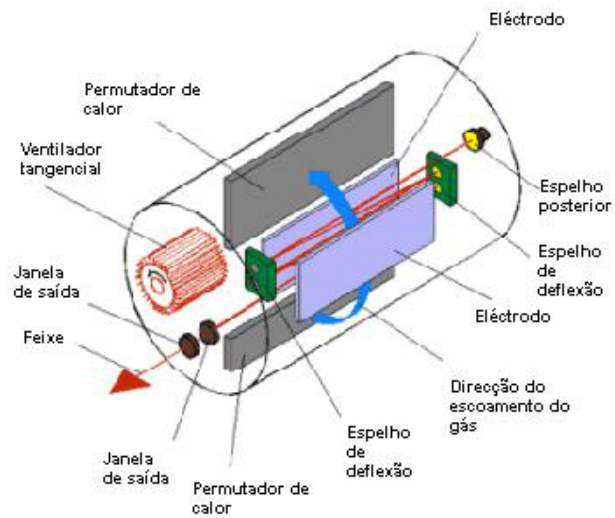


Fig. 14 – Gerador de fluxo transversal [6]

O laser do tipo slab com arrefecimento por difusão é bastante diferente dos tipos construtivos até então conhecidos.

Este tipo de gerador tem uma cavidade opticamente instável em que a excitação é feita por radiofrequência. Na Fig. 15 apresenta-se um esquema representativo do princípio de funcionamento de um laser tipo slab.

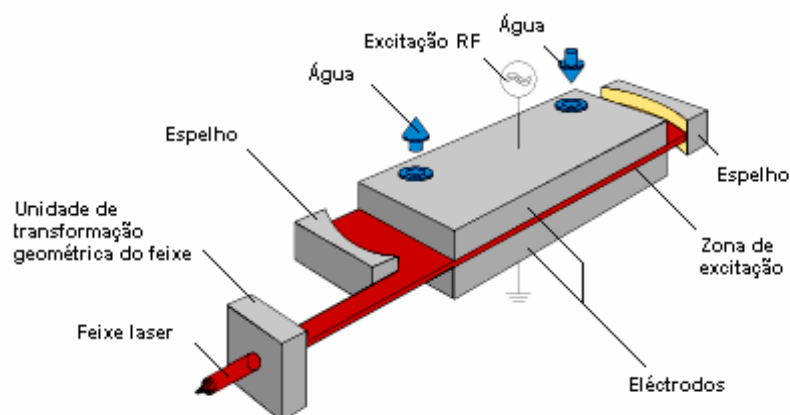


Fig. 15 - Princípio de funcionamento de um laser do tipo slab (Rofin Sinar)

A cavidade é estanque, e como tal, não existe fluxo de gás. O arrefecimento é feito por difusão através dos eléctrodos de grandes dimensões arrefecidos internamente por água. O meio activo é substituído periodicamente através de um bomba de vácuo que aspira o gás lasante da cavidade. Após a formação de vácuo, a cavidade é enchida com gás novo pré-misturado. O construtor Rofin Sinar fabrica este tipo de geradores com cavidades rectangulares, com uma potência máxima de 8 kW. O construtor Trumpf também fabrica este tipo de gerador, mas limitado a uma potência de 2 kW e neste caso a cavidade tem uma geometria cilíndrica. Estes lasers são caracterizados por uma óptima qualidade do feixe, com $K > 0,9$.

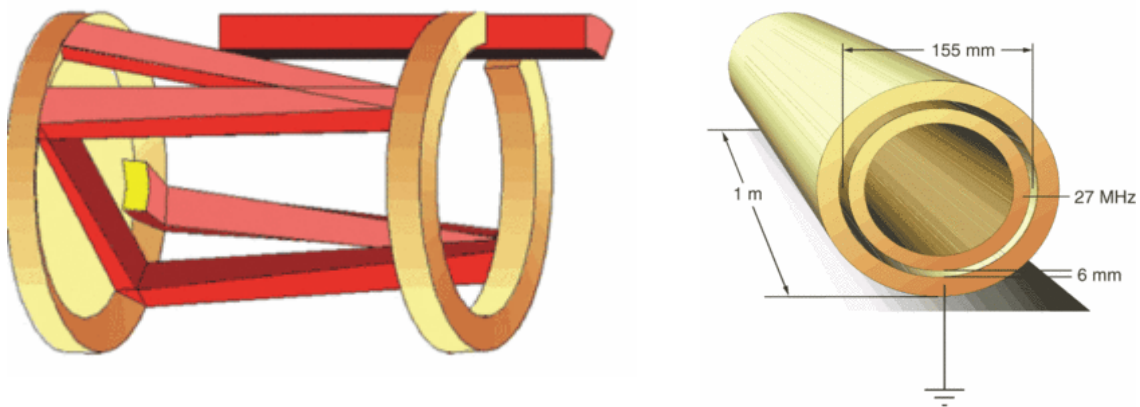


Fig. 16 – Laser tipo slab com cavidade cilíndrica [10]

ii. Laser de excímeros

Estes lasers surgiram na década de 80. O termo “excímero” provém do inglês “**excited dimer**”, isto é, dímeros excitados que são moléculas diatómicas que só existem no estado excitado, ou seja, o estado fundamental corresponde ao estado de dissociação das moléculas. O meio activo é uma mistura gasosa que consiste em gases raros (Ar, Kr, Xe), um gás halogeneto e hélio. Os gases nobres não podem formar compostos com outros elementos em condições normais. Quando se excitam os gases nobres na cavidade, por descarga eléctrica, feixe de electrões ou ambos, os seus átomos ionizam-se. Os iões em conjunto com moléculas neutras (tais como Flúor ou Cloro) formam as moléculas ionizadas, isto é, os dímeros excitados. Dímeros típicos são o fluoreto de Krypton (KrF), o fluoreto de Xenon (XeF), o fluoreto de Argon (ArF) e o cloreto de Xenon (XeCl). A ligação é muito forte e dura apenas uns nanossegundos. Estes

compostos existem temporariamente enquanto o gás nobre estiver no estado de excitação electrónica. Quando os átomos do gás nobre já não se encontram em excitação, a dissociação da molécula nos seus componentes elementares liberta energia na forma de fótons. Quanto maior for esta energia, menor é o comprimento de onda. Em condições apropriadas, este mecanismo é usado para a geração de laser de excímeros.

Os lasers de excímeros geram radiação laser ultravioleta, com comprimento de onda compreendido entre 0,193 μm e 0,351 μm conforme o meio activo, e caracterizam-se por serem capazes de produzirem pulsos muito curtos e de elevada potência. Dado estes curtos comprimentos de onda, os fótons têm energia muito elevada, permitindo a quebra directa das ligações químicas do substracto nos seus componentes químicos, sem que haja transição por fase líquida. Por outras palavras, os lasers de excímeros são capazes de remoção de material por processo fotoablativo. Este processo de dissociação química tem efeitos térmicos mínimos quando comparado com o processo físico de mudança de fase. Por este motivo, designa-se por vezes “corte laser frio”.

Os lasers de excímeros não são suficientemente potentes para quebrar ligações metálicas directamente, mas devido ao curto comprimento de onda, é possível focar um feixe num ponto focal de muito pequenas dimensões.

A combinação de radiação ultravioleta, pulsos curtos e de elevada potência faz com que estes lasers sejam adequados para aplicações de remoção de matéria, embora neste domínio o seu campo de utilização seja essencialmente na microfuração de muito elevada precisão. São usados para microlitografia, micromaquinagem, marcação de materiais termicamente sensíveis, tratamentos de superfície e são usados também em aplicações médicas, em particular cirurgias nos olhos [7, 11, 12]. O processamento com este tipo de laser permite a obtenção de resultados de alta qualidade, precisão e com zona afectada termicamente mínima.

2.2.2.2. *Lasers de estado sólido*

Os lasers de estado sólido utilizam um material cristalino em vez de um gás como meio activo. O mais normalmente usado é um cristal de YAG (Yttrium Aluminium Garnet) dopado com iões de Neodymium (Nd^{3+}) ou ytterbium (Yb^{3+}) que constituem a

espécie activa. A combinação do cristal com os iões da espécie activa define a designação do laser: Nd:YAG ou Yb:YAG.

i. Lasers de Nd:YAG (“rod laser”)

Os lasers de Nd:YAG são constituídos por um varão sólido de YAG (Yttrium Aluminium Garnet) dopado com iões Nd^{3+} (1%) que constitui o elemento activo. O varão (em inglês “rod”) é montado numa cavidade óptica [11]. O bombeamento do meio activo pode ser feito através de lâmpadas de flash (Krypton ou Xenon) ou mais recentemente através de lasers de díodos. O bombeamento por lasers de díodos é muito mais eficiente. A razão prende-se com a banda de emissão de cada solução. As lâmpadas emitem numa banda muito larga, grande parte da qual não pode ser usada para bombeamento e como consequência há um desperdício de energia. No caso dos díodos, a banda é muito mais pequena, sendo que o desperdício é muito menor. O varão tem tipicamente 2 a 8 mm de diâmetro e um comprimento de 20 a 200mm [12].

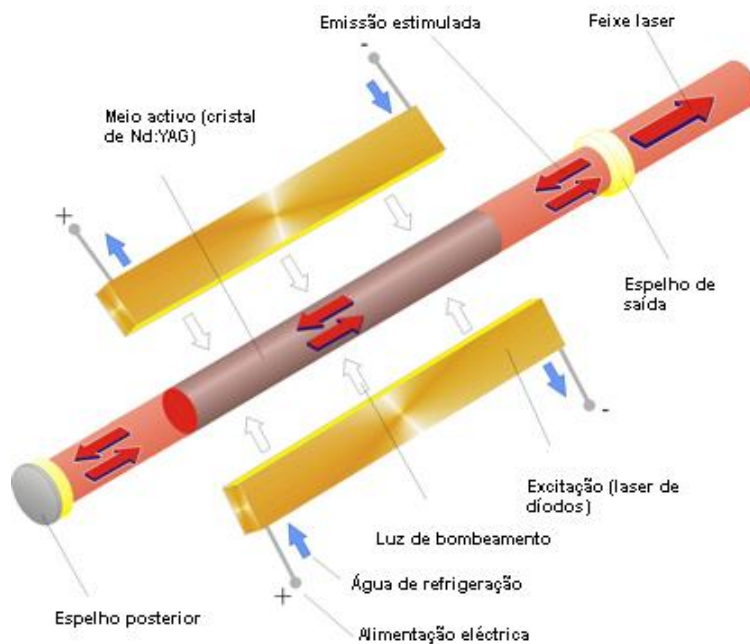


Fig. 17- Laser de Nd:YAG excitado por díodos (Rofin Sinar)

ii. Lasers de Yb:YAG (“disc laser”)

Os lasers de disco representam actualmente uma solução inovadora para os problemas típicos dos lasers do tipo varão, tais como a qualidade do feixe e a dissipação do calor. A geometria particular dos lasers de disco permite um arrefecimento muito mais eficaz e como tal uma muito melhor qualidade do feixe. O varão de YAG é arrefecido por água apenas na sua superfície exterior, resultando num aquecimento acentuado no seu interior. O gradiente térmico do interior para o exterior provoca distorções térmicas, limitando assim a qualidade do feixe. Nos lasers de disco, dado que este é muito fino, a capacidade dissipativa é muito superior, o arrefecimento é muito mais eficiente e o gradiente térmico é desprezável. Tal como nos lasers de varão, o bombeamento por díodos é uma vantagem adicional, pois estes são muito mais eficientes do que as lâmpadas. Estes lasers podem ter um rendimento de 15% comparado com os típicos 3 a 4% dos lasers de varão bombeados por lâmpadas [13, 14].

Nos lasers de disco, o neodýmium é substituído por ytterbium. Uma das vantagens do ytterbium face ao neodýmium, é que os seus iões são muito mais adequados para ocuparem os interstícios da malha de YAG, permitindo níveis de dopagem francamente superiores. Pelo mesmo motivo é possível substituir o varão de YAG por um disco de dimensões muito mais pequenas. Cada disco é capaz de gerar 750 W. Na Fig. 18, está esquematizado o princípio de funcionamento do laser de disco [12].

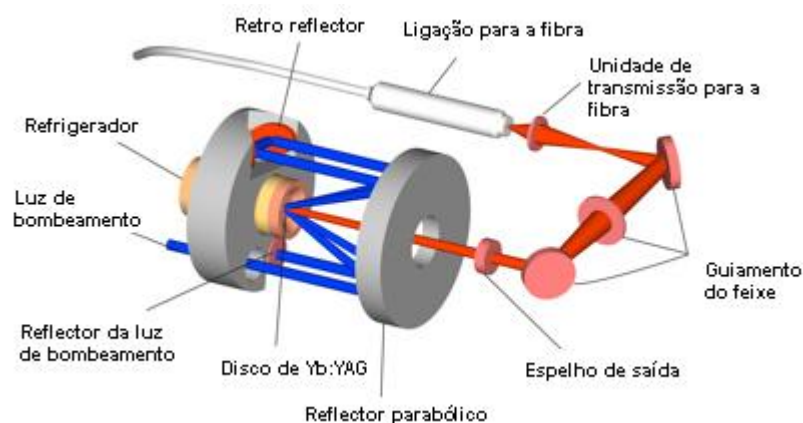


Fig. 18 - Laser de disco de Yb:YAG (Rofin Sinar)

A vantagem de ter uma melhor qualidade do feixe é particularmente importante no contexto da capacidade de focagem e densidade de potência na peça a processar. No entanto, antes de chegar à peça, o feixe tem de ser focado para o interior da fibra óptica e a qualidade do feixe é o factor mais importante para a determinação do diâmetro do núcleo da fibra que ele pode atravessar. Quanto menor for o diâmetro do núcleo da fibra menor é o ponto focal. Actualmente, um laser do tipo varão bombeado por lâmpadas pode ser transmitido por uma fibra com núcleo de 600 μm , enquanto que uma laser de disco pode ser transmitido por uma fibra com núcleo de 200 μm . Isto traduz-se de imediato numa muito maior densidade de potência e como tal na possibilidade de processar mais rápido [13].

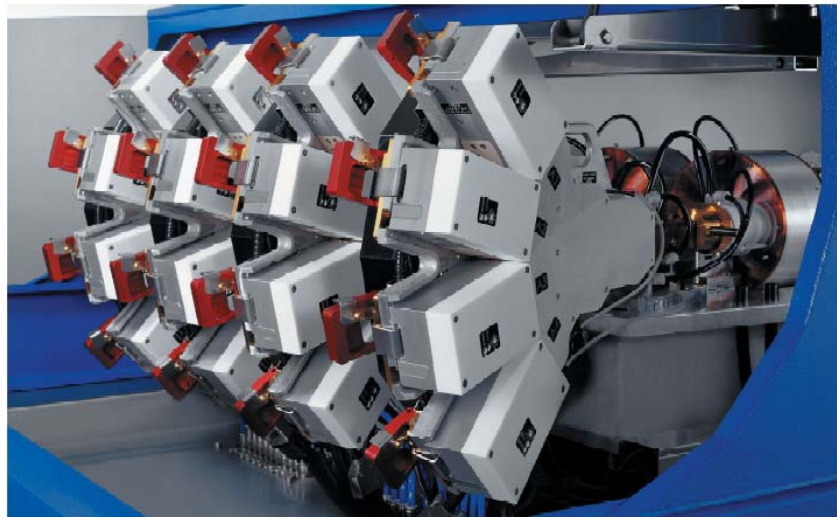


Fig. 19 - Laser de Yb:YAG com vários discos e díodos de bombeamento (Trumpf)

iii. Laser de fibras

Estes lasers caracterizam-se pelo seu tamanho compacto, alta eficiência e excelentes parâmetros do feixe.

Estes geradores são fabricados à base de fibras ópticas de dupla camada (“*dual-core*”). Estas fibras são constituídas por sílica, sendo dopadas no seu interior com o objectivo de amplificar o sinal emitido. Consistem numa região central dopada com iões de erbium, ytterbium, neodýmium ou thalium, seguida de uma segunda camada concêntrica (camada dupla), não dopada, a qual permite a propagação da luz bombeada

até que esta seja totalmente absorvida pela camada central interior. Esta região central actua como cavidade ressonante, na qual a luz absorvida provoca a inversão dos átomos de dopagem. Dois filtros (“Bragg gratings”), inseridos na fibra, provocam uma restrição dos comprimentos de onda, actuando como espelhos de uma cavidade ressonante normal, permitindo estabilizar o comprimento de onda da energia fornecida, reduzir flutuações na intensidade do feixe laser e eliminar modos espectrais aberrantes. A luz incidente, nas camadas externas da fibra, penetra, sendo aprisionada no núcleo (core) onde se encontram as espécies activas responsáveis por um índice de refacção elevado. As camadas externas são em vidro ou material polimérico, tendo índices de refacção reduzidos de forma a impedir a atenuação do sinal (Fig. 20 e Fig. 21) [15].

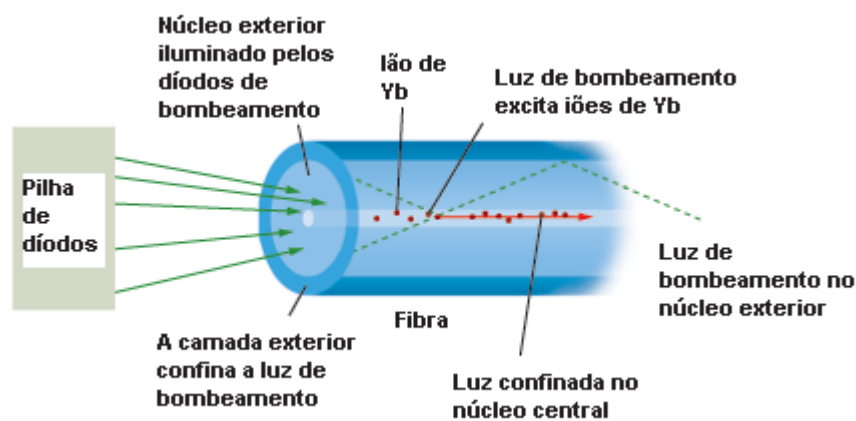


Fig. 20 - Esquema de uma fibra "dual-core"

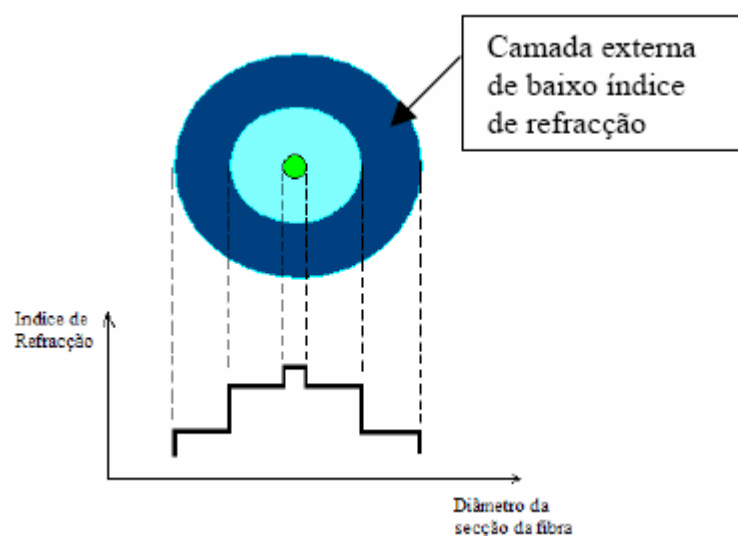


Fig. 21 – Distribuição do índice de refacção das várias camadas de uma fibra óptica

Estes lasers têm uma ótima qualidade de feixe, exibindo um modo TEM₀₀ completamente circular no caso dos lasers cujas fibras sejam de reduzidas dimensões (da ordem dos microns). Actualmente, o limite de potência para um feixe de modo singular está em 2kW em modo contínuo, e provem de um laser dopado com ytterbium, emitindo perto dos 1,1µm. Outros lasers em que se tem observado um aumento de potência são os de fibra dopada com erbium, emitindo em 1,5 a 1,6 µm, e com thalium, emitindo em 1,8 a 2,2 µm.

Alguns lasers de fibras estão já disponíveis comercialmente, com potências de algumas centenas de Watts, e têm já sido empregues em processamento de materiais [16].

A tecnologia de laser de fibras oferece diversos benefícios para os utilizadores industriais. Um gerador deste tipo de 4 kW ocupa uma área de 0,5 m² contra os 11 m² de um laser convencional de Nd:YAG bombeado por lâmpadas, além de não precisar de um arrefecedor (“*chiller*”). São facilmente integrados em qualquer tipo de sistema. A divergência é baixa, mesmo com elevada potência. São extremamente estáveis e são praticamente isentos de manutenção, pois não existe necessidade de troca de lâmpadas ou díodos. O alto rendimento reduz drasticamente os custos operacionais [17]. A boa qualidade do feixe permite a obtenção de um ponto focal substancialmente menor do que os lasers convencionais. Um feixe de 1 kW pode ser focado num ponto com 50 µm de diâmetro com uma lente de 4”.

Em termos de preço, estes geradores podem ser comparados aos de Nd:YAG bombeados por lâmpadas, para potências até 1 kW. Para potências superiores, o preço é mais elevado, mas tendo em conta os custos da área, arrefecedor e manutenção, estes geradores deverão ser mais rentáveis.

Recentemente, foram instalados algumas fontes experimentais com potência de vários kW, em fábricas europeias. Os resultados são muito promissores. Um gerador experimental de 2 kW foi utilizado para a soldadura de chapa zincada de 1,2mm à velocidade de 5 m/min. A qualidade e a performance foram equivalentes à de um gerador de Nd:YAG, do tipo “*rod laser*”, bombeado por lâmpadas e com potência de 4 kW. Um outro gerador de 2 kW, com fibra de 300 µm, cortou chapa de aço revestida de 4 mm a uma velocidade de 10 m/min, com aresta perfeitamente limpa. A máxima velocidade de corte obtida foi de 16 m/min. Nos Estados Unidos, o construtor IPG

Photonics, instalou duas fontes multi-kW na empresa americana Alabama Laser, para aplicações de corte e soldadura [18, 19]. O mesmo fabricante instalou em Bremen, na Alemanha, um gerador multi-modo de 17 kW para um centro de testes de soldadura em ligas de alumínio [16].



Fig. 22 - Corte de chapa de 3mm, com laser de fibras (Alabama Laser)

iv. Laser de díodos

Os lasers de díodos são conhecidos pela sua aplicação na indústria das comunicações, computadores e electrónica. Em todas estas indústrias, são empregues geradores com potências na ordem dos mW. Mais recentemente têm sido empregues também no processamento de materiais. O interesse no desenvolvimento deste tipo de geradores é grande pelas seguintes razões: são compactos, têm potencial para serem fabricados em massa, são integrados facilmente, as suas propriedades estão em rápida melhoria, a potência e eficiência tem subido e são largamente empregues como fontes de bombeamento em lasers de estado sólido.

A maioria dos materiais semicondutores é baseada numa combinação de elementos do grupo III da Tabela Periódica (tais como o Al, Ga, In) e do grupo V (tais como N, P, As, Sb), referidos como componentes III-V. Alguns exemplos são as ligas de GaAs, AlGaAs, InGaAs e InGaAsP. Os comprimentos de onda estão normalmente compreendidos entre 630-1600 nm, mas recentemente foi desenvolvido um laser de

InGaN capaz de emitir radiação azul contínua, com comprimento de onda de 410 nm, à temperatura ambiente.

O princípio de funcionamento de um laser de semiconductor é muito diferente dos princípios dos lasers de CO₂ ou Nd:YAG, assentando no princípio de “radiação de recombinação”.

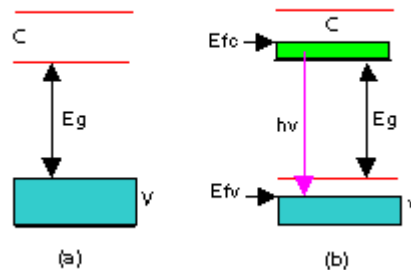


Fig. 23 - Princípio de funcionamento de um laser de diodo [7]

Os materiais semi-condutores têm uma banda de valência e uma banda de condução. No estado inicial, a banda de valência está completamente preenchida e a banda de condução está completamente vazia, correspondendo a um estado de energia que pode ser designado por E_g (Fig. 23 a). A excitação da banda de valência provoca a deslocação de alguns electrões para a banda de condução. Entretanto, os electrões dos níveis superiores da banda de valência vão ocupar os espaços vazios de menor energia originados pela movimentação dos electrões para a banda de condução, dando origem a duas novas fronteiras E_{fc} e E_{fv} (Fig. 23 b). A relação $E_{fc} - E_{fv} > E_g$ define a condição crítica para a geração laser [7].

A radiação laser com uma potência de alguns mW pode ser produzida numa zona muito fina e estreita, tipicamente com uma área aproximada de $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$. Estas zonas podem ser combinadas formando uma “barra” (com aproximadamente $10000\ \mu\text{m} \times 1200\ \mu\text{m} \times 115\ \mu\text{m}$). Uma superfície emissora típica consiste em 20 campos com 25 emissores individuais cada um.

A cavidade ressonante é composta por duas superfícies da barra. As barras são revestidas para terem as propriedades reflectoras desejadas.

A radiação emitida tem alta divergência na direcção da transição pn (“eixo rápido”) e um modo TEM₀₀. Na direcção paralela ao plano da transição pn (“slow

axis”), o feixe apresenta um modo resultante da sobreposição dos vários grupos emissores [12].

Os lasers de díodos podem alcançar potências elevadas, resultantes da combinação de várias barras instaladas num dissipador de calor. Esta combinação designa-se por pilha, do inglês “stack”. Actualmente, é possível combinar cerca de 30 elementos, proporcionando uma potência superior a 1 kW por pilha. Utilizando uma geometria e ópticas adequadas, é possível combinar várias pilhas, permitindo obter uma potência de cerca de 3 kW, o que é hoje um valor standard disponível comercialmente.

Tipicamente, a radiação laser proveniente de laser de díodos, usando sistemas ópticos e cilíndricos, pode ser focada num ponto quadrado com alguns mm². Esta traduz uma das principais limitações ao uso no campo do processamento de materiais, pelo menos nas aplicações que exijam elevadas densidades de energia, como é o caso do corte de chapa metálica [12]. No entanto, Knitsch *et al* [20], conseguiram extrair uma densidade de potência de 10⁶ W/cm², suficiente para corte de metais, usando técnicas “multiplexing” de polarização e comprimentos de onda.

2.2.3 Sistemas de análise

Os equipamentos de processamento de materiais por laser tendem a ser cada vez mais autónomos, necessitando cada vez menos da intervenção de operadores. Nesse sentido, foram desenvolvidos alguns sistemas de monitorização, para permitir a detecção de anomalias durante o processamento e eventualmente actuar preventiva ou correctivamente.

Neste trabalho, referimos apenas os sistemas de monitorização de plasma, por ter sido usado neste trabalho e também por serem os mais usados industrialmente. O plasma tem grande influência, benéfica ou nefasta, no processamento de materiais por laser. Na maioria das aplicações de corte e soldadura, o plasma é prejudicial, excepção feita ao corte de alta velocidade, objecto de estudo deste trabalho. Neste sentido, é importante controlar a formação de plasma. Esse controlo é feito através de um sistema capaz de fazer a aquisição de um determinado sinal, analisá-lo e tomar alguma acção em função desse sinal.

As características ópticas, eléctricas e acústicas do plasma podem ser convertidas em sinais eléctricos através de sensores adequados. Esse sinal eléctrico pode ser utilizado para acções preventivas ou correctivas.

Jurca Marius-Christian [21] patenteou um processo de monitorização de plasma utilizando um sensor óptico sensível ao espectro de emissão radiativa do plasma induzido por laser. Actualmente, todos os equipamentos standard de corte por laser vêm equipados com esta funcionalidade.

Alguns trabalhos mais recentes [22-25] têm sido desenvolvidos no estudo das propriedades eléctricas e magnéticas do plasma e na possibilidade do uso destas grandezas para a monitorização do plasma. Do mesmo modo, *Szymanski et al* [26] correlacionaram sinais ópticos e acústicos provenientes do plasma, explorando as possibilidades de uma monitorização acústica. Embora os resultados destes trabalhos tenham sido interessantes, a monitorização óptica continua a ser a mais utilizada industrialmente.

2.2.4 Sistemas de automatização de tarefas

2.2.4.1. Manuseamento de chapa

Existem estudos que apontam que uma das tarefas mais dispendiosas no corte por laser é a carga e a descarga das chapas. Estima-se que, numa máquina sem qualquer dispositivo de auxílio ao manuseamento da chapa, o tempo útil de produção é de cerca de 50%. No tempo restante, a máquina tem de aguardar pela descarga de material já cortado e pela carga de uma chapa nova. Os sistemas de troca de mesas permitiram uma melhoria muito significativa, mas ainda é cada vez mais insuficiente, pois muitas vezes, a máquina é mais rápida a processar a chapa do que o operador a fazer a carga e a descarga. A utilização de sistemas automáticos de carga e descarga permitem aumentar o tempo útil de produção para valores compreendidos entre 80 e 90% [27]. Na Fig. 24, apresenta-se uma solução de carga e descarga.



Fig. 24 - Máquina de corte laser com sistema de carga, descarga e armazém automático (Adira)

2.2.4.2. Sistemas de automatização de tarefas

Alguns desenvolvimentos importantes têm sido desenvolvidos com o objectivo de reduzir tempos de preparação das máquinas. A preparação de uma máquina de corte por laser está normalmente associada à troca do bico de corte e da lente. O construtor japonês “Mazak”, no seu modelo “HyperGear”, automatizou este tipo de tarefas. Em apenas um minuto, é possível fazer troca de lente, bico de corte e ainda o seu centramento. Também o construtor alemão “Trumpf” anunciou recentemente um sistema de troca automática do bico de corte.

2.3. *Mecanismos do corte por laser*

O processamento de materiais por laser é essencialmente um processo termoquímico em que o material é removido através alterações químicas e de fase podendo para os materiais metálicos, distinguir-se basicamente cinco tipos: corte por vaporização, corte por fusão, corte por fusão reactiva, corte frio e oxi-corte assistido por laser.

2.3.1 Corte por vaporização

No corte por vaporização, a energia do feixe é suficiente para aquecer o material acima do seu ponto de ebulição e o material deixa a superfície sob a forma de vapor.

Este tipo de corte verifica-se em presença de uma densidade de energia elevada ou em materiais com pontos de fusão e ebulição muito próximos.

Inicialmente, a incidência do feixe na superfície provoca o seu aquecimento. À medida que a temperatura aquece, a reflectividade da superfície diminui e como tal dá-se uma rápida subida de temperatura até ao ponto de ebulição, levando à formação de vapor. O vapor deixa a superfície com uma velocidade elevada arrastando consigo partículas criando uma cavidade cilíndrica, designada por “keyhole”. A formação do “keyhole” provoca um aumento repentino de absorção devido a múltiplas reflexões, o que por sua vez leva a que o “keyhole” se desenvolve em profundidade na chapa [8, 11].

Neste modo de corte, a camada fundida evapora antes de alcançar a parte inferior da frente de corte. Consequentemente, a radiação laser absorvida é gasta essencialmente na produção de vapor, enquanto que apenas uma pequena parte é conduzida para a peça [28].

2.3.2 Corte por fusão

No processo de corte por fusão, o mecanismo básico pelo qual o corte ocorre consiste no aquecimento acima da temperatura de fusão na frente de corte. O material fundido é ejectado para baixo ou para trás na frente de corte pela acção do gás de assistência, aplicado coaxialmente.

A absorção da radiação laser acontece por intermédio de dois mecanismos principais: a absorção de Fresnel, a qual resulta da interacção directa do feixe com o substrato, e absorção pelo plasma com re-irradiação, a qual tem uma influência menor pois o plasma é expulso pelo escoamento do gás. A absorção provoca a fusão do substrato e a matéria em fusão é expulsa pela força de arrasto do escoamento de alta velocidade. No fundo da fenda de corte, a matéria em fusão é mais espessa devido à desaceleração do filme e às tensões superficiais que retardam a sua expulsão. O escoamento do gás tem uma função essencialmente de expulsão da matéria em fusão, pois o efeito de arrefecimento é desprezável, devido à muita pequena área envolvida no corte por laser. De grande importância são o alinhamento e a geometria do bico de corte [8].

2.3.3 Corte por fusão reactiva

Se o processo de corte por fusão for assistido por um gás reactivo, tipicamente oxigénio ou misturas contendo oxigénio, então uma nova fonte de energia é adicionada ao processo e que resulta da reacção exotérmica do gás com o material. A função do gás atravessando a fenda de corte não é apenas a ejeção da matéria fundida passando a ter também a função de promover a reacção exotérmica.

A reacção inicia-se na superfície superior, quando a temperatura atinge a temperatura de ignição. O óxido forma-se e é arrastado ao longo da fenda, cobrindo a superfície de corte. O aumento de energia proveniente da reacção exotérmica depende do material em causa. No caso do aço não ligado ou do aço inoxidável ronda os 60%, enquanto que para o titânio pode chegar a 90%. Por este motivo, as velocidades de processamento são normalmente o dobro das possíveis para corte por fusão sem reacção exotérmica.

Os efeitos da reacção na superfície de corte são diferentes consoante o tipo de material cortado. No caso do aço não ligado, o efeito mais visível é a formação de uma muito fina camada de óxido que reveste toda a superfície de corte. Uma vantagem é o facto de que o óxido, no caso do aço não ligado, flui bem reduzindo a adesão de rebarba. No caso do aço inoxidável, o óxido é formado por compostos de elevado ponto de fusão, que solidificam mais rápido criando problemas de adesão de rebarba. O mesmo sucede com alumínio [8].

2.3.4 Corte frio

O corte frio é uma técnica recente introduzida com o aparecimento dos lasers de excímeros de potência elevada. Estes lasers emitem radiação ultra-violeta capaz de quebrar as ligações químicas por absorção de fotões. Quando a radiação incide num substrato com energia de ligação inferior à energia dos fotões incidentes, e quando o fluxo de fotões é tal que exista pelo menos um fotão para cada ligação, então o material é suprimido sem qualquer aquecimento. Este tipo de corte usado em aplicações de corte de alta definição, gravação, aplicações médicas, etc [8].

2.3.5 Oxi-corte assistido por laser (processo LASOX)

Se o feixe laser for usado como fonte de ignição de um metal sob uma corrente de oxigénio, em certas condições, é possível cortar espessuras muito elevadas com potência relativamente baixa. Por exemplo, é possível o corte de 50 mm de espessura a uma velocidade de 200 mm/min, com uma potência de 1 kW. Este processo é no essencial idêntico ao tradicional processo de oxi-corte, com a mesma dimensão de fenda de corte da ordem dos 4 mm. No entanto, este processo apresenta algumas vantagens:

- superfície de corte com ângulo inferior a 2°;
- baixa variação de rugosidade ao longo da superfície de corte;
- menor distorção, devida à ausência de jactos quentes;
- o processo é omni-direccional sendo independente da polarização do laser.

A condição fundamental para o início do processo é que a zona do substrato circundante à zona sobre a qual o gás incide esteja a uma temperatura superior a 900° C. Neste sentido, é usada uma lente com baixa distância focal, com o ponto focal colocado no interior do bico de corte, para que o diâmetro do ponto de incidência do feixe sobre a chapa seja suficientemente grande para circunscrever a área de incidência do fluxo de oxigénio [8].

2.4. *Caracterização física do plasma induzido por laser*

2.4.1 Definição de plasma induzido por laser

Quando um feixe laser focado através de uma lente incide num gás, para uma dada densidade de potência observa-se a formação de um plasma [29-31]. A formação do plasma está associada a um mecanismo de disrupção do gás, vulgarmente designado por "optical breakdown". Lasers de alta energia, como os lasers Q-switched ou com pulsos ultra-curtos, são capazes de provocar a disrupção de um gás puro de forma semelhante a uma explosão. Com lasers de menor energia ou pulsos mais compridos, os plasmas podem ser iniciados junto a superfícies sólidas, onde se verifica a evaporação do substrato, e depois propagarem-se no sentido do feixe a velocidades sub ou supersónicas, conforme os mecanismos de propagação. Se o laser for contínuo na sua

saída e as condições ópticas e de escoamento forem favoráveis, então um plasma pode ser mantido de forma estável, na região próxima do ponto focal. Este expande-se no sentido do feixe até um certo ponto em que a intensidade do feixe seja apenas a necessária para equilibrar as perdas por convecção, condução e radiação térmica [29].

2.4.2 Mecanismo de formação do plasma induzido por laser

2.4.2.1. As fases transientes e os mecanismos de propagação

O plasma induzido por laser foi observado pela primeira vez por Maker em 1963, com o advento do laser de ruby Q-Switch. Estes plasmas formavam-se espontaneamente por disrupção de gás no ponto focal, e tinham a mesma duração do pulso do laser.

Soubacq *et al* [32], efectuaram um estudo recente, bastante detalhado, sobre a formação de plasmas induzidos por um laser Nd:YAG com pulso de 12 ns em ar a diferentes pressões. Segundo estes autores o plasma tem as seguintes fases transientes, que podem descritas da seguinte forma:

- Fase de pre-ionização, correspondente ao crescimento do impulso laser, na qual são gerados electrões em volume constante, em que o gás permanece “frio”;
- Fase de expansão, na qual o plasma se torna altamente absorvente e se expande para fora do volume focal, através de um mecanismo de onda de choque;
- Fase de pós-descarga, na qual o plasma, confinado a um pequeno volume, está quente e se expande como uma onda explosiva.

No início da fase de pre-ionização, são criados electrões de baixa energia, os quais designamos por electrões iniciais. Existem dois mecanismos principais para a geração de electrões:

- Ionização multi-fotão (IMF), em que o átomo ou a molécula absorve simultaneamente um número de fotões suficiente para provocar a sua ionização (ou ejectar um electrão de valência para a banda de condução).
- Ionização por absorção de radiação, em que a interacção do campo electromagnético com os electrões livres provoca um aumento da sua energia, por via do efeito inverso de “bremsstrahlung”.

Falando da ionização de um gás puro, geralmente a emergência dos primeiros electrões não é gerada por processo fotoeléctrico directo (Fig. 25), pois o potencial de ionização dos átomos ou moléculas de gás é maior do que a energia dos fotões.

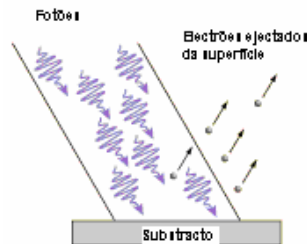


Fig. 25 – Efeito fotoeléctrico

O potencial de ionização da maioria dos gases é maior do que 10 eV. Na Tabela 1, são apresentadas as energias de ionização para alguns gases tradicionalmente usados como gases de assistência em corte por laser bem como de alguns elementos de substratos.

Elemento	Energia de ionização (eV)
Hélio	24,5874
Azoto	14,5341
Oxigénio	13,6181
Árgon	15,7596
Alumínio	5,96
Crómio	6,74
Níquel	7,61
Ferro	7,83

Tabela 1 - Energias de ionização [33]

Recorrendo à equação de Planck,

$$E = h \cdot \nu \quad \text{Eq. 5}$$

em que E é a energia, h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação, no caso de um laser de CO_2 , em que o comprimento de onda é $10,6 \mu\text{m}$, verifica-se que cada

fotão tem uma energia de 0.117 eV. Para ionizar uma molécula de oxigénio, por exemplo, cuja energia de ionização é a mais baixa dos gases apresentados na Tabela 1 e tem o valor de 13,6181 eV, seria necessário que a molécula absorvesse simultaneamente mais de 100 fotões o que exige uma irradiância muito elevada. Pela fórmula de Planck (Eq. 5), vê-se que a ionização multi-fotão é tanto mais importante quanto menor for o comprimento de onda da radiação incidente. Quanto menor for o comprimento de onda, maior será a frequência da radiação e logo maior será a energia. Assim, para um laser de Nd:YAG, por exemplo, são necessários 10 vezes menos fotões do que para um laser de CO₂ para originar a ionização de uma molécula de um gás.

Como foi referido anteriormente, para um comprimento de onda de 10,6 μm e para a ionização de um gás puro, os primeiros electrões livres não são criados por processo foto-eléctrico directo, pois a energia de ionização é superior à fornecida pelos fotões. No entanto, o processo de ionização de um gás sobre um substrato sólido é bastante diferente. A absorção de radiação por parte do sólido gera um vapor contendo elementos do gás de assistência bem como elementos e impurezas do substrato. Assim, como o vapor é composto por elementos com potencial de ionização mais baixo, e no caso da irradiância ser suficientemente alta, é possível gerar os electrões livres iniciais por ionização multi-fotão (IMF). Diversos estudos experimentais de caracterização de plasmas por espectrometria confirmam que estes são compostos por iões provenientes tanto do gás como do substrato [2, 26, 34-37]. Isto explica que para provocar a disrupção de um gás livre seja necessária uma irradiância muito superior àquela que é necessária para a situação em que existe um substrato sólido. Radziemski e Cremers [29] referem ser necessário uma irradiância de 10⁹ W/cm² para provocar a disrupção do ar, enquanto que a mesma se verifica com uma irradiância de 10⁷ W/cm² na proximidade de uma superfície sólida. Althaus e Hugenschmidt [38], no entanto, apontam valores uma ordem de grandeza inferiores.

A interacção da radiação com os primeiros electrões livres provoca o seu aquecimento, pelo efeito inverso de “bremsstrahlung”. Este efeito consiste num aumento de energia devido à absorção de um fotão por um electrão livre por acção de um campo electromagnético na presença de um terceiro corpo, como um átomo ou um ião [39]. O aquecimento leva à geração de mais electrões e como tal a uma maior taxa de absorção. É então provocada uma disrupção em cascata, em que a concentração de electrões cresce exponencialmente com o tempo.

Os processos de perdas de energia concorrem com os de aumento de energia durante a fase de aumento de densidade de electrões por causa das ligações de electrões com espécies neutras levando à formação de iões negativos. A ligação de um electrão com uma molécula leva à formação de um ião negativo e corresponde à redução do número de electrões livres no gás ionizado [29, 32, 40-42].

No início, o efeito inverso de “bremsstrahlung” é do tipo electrão-átomo-fotão sendo que após a geração de um número suficiente de electrões, o mecanismo transforma-se em absorção electrão-ião-fotão. A mudança de mecanismo coincide com a passagem de mecanismos ténues de absorção que controlam a fase inicial para um plasma luminoso fortemente absorvente, que rapidamente atinge temperaturas muito elevadas (perto de 10^4 K) [29, 32, 43, 44]. Então o plasma quente interage com a atmosfera vizinha, sendo que a atmosfera adjacente ao plasma é aquecida, fazendo com que os gases inicialmente transparentes à radiação laser por estarem frios, passem a absorvê-la. Quando se liberta um número suficiente de electrões, a camada de gás aquecida torna-se muito absorvente e rapidamente se geram as condições para a formação do plasma. Este fenómeno transmite-se à atmosfera circundante. Como resultado, a frente de plasma propaga-se na atmosfera vizinha contra o feixe laser incidente formando as ondas de absorção suportadas por laser (ASL). As ASL são geralmente classificadas em três grupos: ondas de combustão suportadas por laser (CSL), ondas de detonação suportadas por laser (DSL) e ondas de radiação suportadas por laser (RSL). As diferenças entre estas três ondas nascem do seu mecanismo de propagação pela atmosfera, inicialmente fria e transparente à radiação laser. Na onda CSL, quente e lenta, a energia é transferida do plasma para a atmosfera vizinha essencialmente por condução térmica e a sua velocidade de propagação é sub-sónica. Este tipo de onda verifica-se para níveis de irradiância menores do que 10^7 W/cm². Na onda DSL, que se verifica para irradiâncias intermédias (maiores do que 10^7 W/cm²), o plasma propaga-se à velocidade do som para a atmosfera e o processamento do material é impedido. Para níveis de irradiância ainda maiores, a radiação do plasma é tão quente que, ainda antes da chegada da onda de choque de propagação, o gás aquece ao ponto de deixar de ser transparente e passar a absorver. A onda RSL é de muito rápida propagação e cria um plasma muito quente que emite radiação de comprimento de onda extremamente curto [29, 36, 45].

2.4.3 Caracterização do plasma induzido por laser

É possível encontrar na literatura estudos de caracterização de plasmas induzidos por laser, embora os critérios por vezes sejam contraditórios. Esses estudos caracterizaram os plasmas induzidos por laser em diferentes substratos e com gases diferentes, com recurso a espectrómetros para identificação das espécies constituintes da pluma. Outros aspectos dessa caracterização passaram por medições ao nível da temperatura, densidade de electrões, transmissibilidade da pluma e velocidade da onda de choque. Os resultados nem sempre são concordantes entre os vários autores. No entanto, algumas conclusões indicam que temperatura da pluma é superior 11.000 K, a densidade de electrões é superior a 10^{17} cm^{-3} , a transmissibilidade sofre muitas flutuações devido à ejeção de partículas líquidas e a onda de choque deverá ter uma velocidade da ordem dos 60 km/s [35-37, 44, 46].

Alguns estudos teóricos consistiram no desenvolvimento de modelos matemáticos com o objectivo de calcular algumas características do plasma, tais como a distribuição espacial de temperatura, da velocidade e concentração do vapor, o coeficiente de absorção e o índice de refração [42, 47, 48].

2.5. *A influência do plasma no corte por laser*

Diversos autores referem a influência do plasma no processamento de materiais por laser, nomeadamente no corte e na soldadura. Como regra pode ser feita a seguinte distinção: se o plasma se encontrar sobre a superfície do material, actua como uma barreira entre a radiação laser e o material. Se pelo contrário, ele se formar dentro de uma cavidade (vulgarmente designada por “keyhole”), na interface entre a fenda de corte já produzida e o material, terá como efeito um substancial incremento do coeficiente de acoplamento da radiação ao material [42, 49, 50]. Para altos valores de energia, todas as experiências mostram a mesma tendência: após a disrupção do gás, o plasma propaga-se contra o feixe incidente, até que a pluma se afasta da peça, a transferência de energia interrompe-se e o processo extingue-se. Este fenómeno é designado por efeito de absorção do plasma (em inglês “plasma shielding”), sendo que o corte resultante é dependente da intensidade deste [2, 45]. Os efeitos deste fenómeno

são tanto maiores quanto maior for a distância de propagação do plasma [45] . Em condições normais de corte, o plasma está confinado à parte inferior da fenda de corte, o escoamento de gás tem velocidade constante desde a superfície superior à superfície inferior da chapa e o corte é de boa qualidade [30]. Nas aplicações industriais, a situação mais frequente em que se verifica a formação de plasma, é no corte assistido com N_2 . Tipicamente, este tipo de corte é efectuado com alta pressão o que favorece as condições para a ignição do plasma. Alguns autores correlacionam o aparecimento do plasma de cor azul com más condições de corte. Foi também estabelecida uma correlação entre o aparecimento do plasma azul e o ângulo da frente de corte, sugerindo um plasma mais intenso quando o ângulo é maior [31] .

Alguns autores relacionam a ignição de plasma a algumas perturbações do escoamento da camada fundida, por heterogeneidade do material, velocidade, potência ou escoamento do gás [2, 38]. O plasma expande-se e induz alta pressão no ponto onde se forma. Uma evaporação explosiva do metal fundido é verificada no ponto de irradiação laser ao mesmo tempo que se verifica a formação de plasma [31] . Se o ponto de formação do plasma for suficientemente próximo da superfície inferior da chapa, a camada fundida é expulsa formando uma cratera pela força da explosão e o plasma extingue-se, pois o material que poderia reagir com o feixe é removido [2, 31].

Se a pressão induzida pelo plasma não for removida da área do feixe, a criação de plasma é alimentada por este bloqueio de material e contínua. Neste momento, o processo colapsa. O plasma move-se para o topo da peça e é ainda mais aumentado pelo feixe e pelo material evaporado pela radiação do plasma. Neste ponto, o feixe tem de ser desligado para extinguir o plasma.

O aparecimento de plasma é altamente dependente da pressão do gás de assistência, da densidade de potência do feixe e da velocidade de corte.

A sua dependência com a pressão é complexa: uma pressão demasiado alta pode induzir turbulências levando a possíveis perturbações no escoamento e aumentar a densidade de electrões livres (uma das condições para o aparecimento de plasma é uma elevada densidade de electrões livres juntamente com uma elevada densidade de energia) pela compressão do metal evaporado baixando assim o nível de intensidade de energia necessário à ignição. Uma pressão demasiado baixa leva ao colapso do corte por uma insuficiente expulsão de metal.

Um aumento da velocidade aumenta o risco de ignição de plasma e existe uma velocidade para a qual o corte cessa independentemente da pressão [2]. Horisawa [30,

31] concluiu que com o aumento de velocidade, a região de formação de plasma onde o feixe está focado é mais extensa porque o aumento da velocidade provoca um atraso ou curvatura da frente de corte, e o feixe passa a incidir na superfície curva. Verifica-se que o plasma aumenta com a incidência do feixe nesta superfície. O mesmo autor relacionou a velocidade de escoamento da matéria fundida com a velocidade de corte e por conseguinte com o plasma. De acordo com os seus estudos, o aparecimento de plasma diminui a velocidade de escoamento e aumenta o ângulo de dispersão do escoamento de matéria fundida.

Outros autores, como Zuo [45], estudaram alguns efeitos do plasma no mecanismo de corte por laser. Quando ocorre o efeito de absorção do plasma, este absorve 50% da energia incidente do feixe. Este autor estudou as consequências do efeito de absorção do plasma, nomeadamente o efeito de lente negativa. Este fenómeno alarga a dimensão do feixe no ponto focal e modifica a posição do ponto focal. Conclui-se que mais importante do que a absorção de energia por parte do plasma, é o efeito de lente, mudando as condições de corte e levando à interrupção do processo.

Pode por isso dizer-se, em termos gerais, que a formação de plasma no corte por laser é considerada nefasta, pois este absorve parcialmente a radiação proveniente do feixe além de alterar a posição e o diâmetro do feixe no ponto focal.

No entanto, segundo Thonshoff *et al* [2], para chapas de pequena espessura (<1mm) é possível cortar na presença de plasma usando diferentes parâmetros. Se a espessura for de alguns milímetros, o corte na presença de plasma não é possível. Althaus e Hugenschmidt [38], um pouco em oposição à ideia de que o plasma é sempre prejudicial em corte por laser, através de medições de temperatura dos alvos metálicos sob condições de plasma, concluíram que essas atingem temperaturas 3 a 10 vezes superiores às que seriam alcançáveis sob condições de absorção pura de radiação laser. Preiig *et al* [1] estudaram algumas das potencialidades do corte na presença de plasma, sustentados em hipóteses semelhantes às referidas por Althaus e Hugenschmidt. Esses autores desenvolveram um modelo de corte novo em que a entrega energética não é feita apenas por absorção pura da superfície, mas também devido à formação de plasma e reflexão múltipla. Por oposição ao tipo de corte clássico, no qual se forma uma frente de corte semicilíndrica, neste modelo forma-se um “key-hole” fechado com ejeção da camada fundida, permitindo o corte a velocidades muito superiores. Para que este processo de alta velocidade se forme, é necessário que a geometria da frente de corte se transforme, bem como os mecanismos que determinam a transferência de energia e

expulsão do material fundido. A tecnologia deste processo faz uso de efeitos térmicos e hidrodinâmicos muito diferentes dos convencionalmente reconhecidos no corte por fusão, que entram em jogo quando em presença de altas velocidades e intensidade de feixe extremamente elevadas. Com efeito, uma intensidade de energia elevada é uma exigência básica para este tipo de corte e é uma das causas responsáveis pelo sobreaquecimento da superfície do filme fundido, causando a sua vaporização e consequente formação de plasma na zona de interacção. Uma segunda diferença em relação ao corte convencional por fusão, são os elevados gradientes de pressão de vapor emergente da frente de corte transportando material fundido numa direcção predominantemente lateral contra as paredes do corte (Fig. 26).

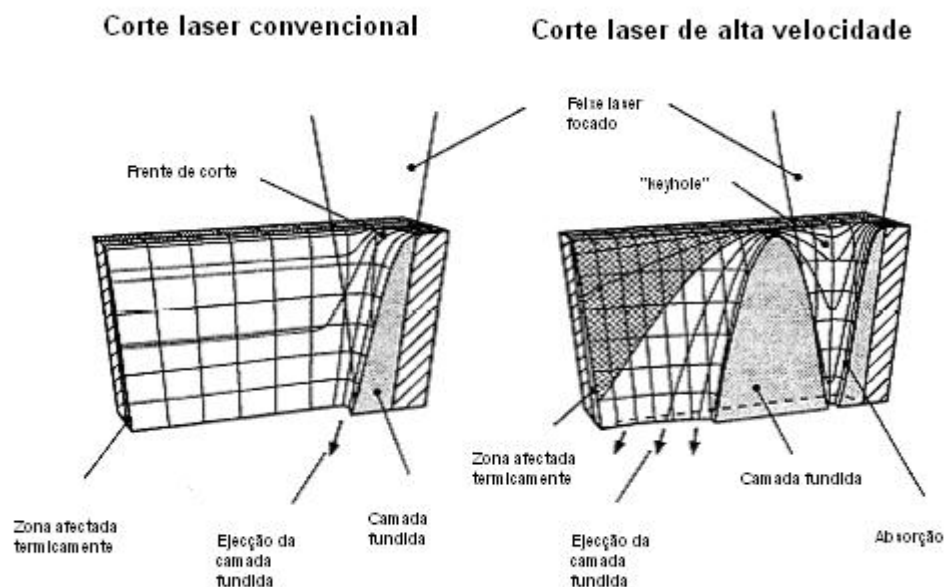


Fig. 26 – Corte convencional vs Corte de alta velocidade [1]

Este movimento lateral do material fundido contra as paredes de corte provoca o fecho da fenda de corte atrás da zona de interacção, levando à formação de um capilar de vapor (Fig. 27 e Fig. 28). O vapor atinge velocidades elevadas e juntamente com as ondas de choque, o escoamento ganha uma capacidade de expulsão do material fundido que é suficiente para a obtenção de um corte sem rebarba.

Adicionalmente, a remoção de material é feita também por vaporização, a qual pode atingir valores até 60%, dependendo do material em causa [8].

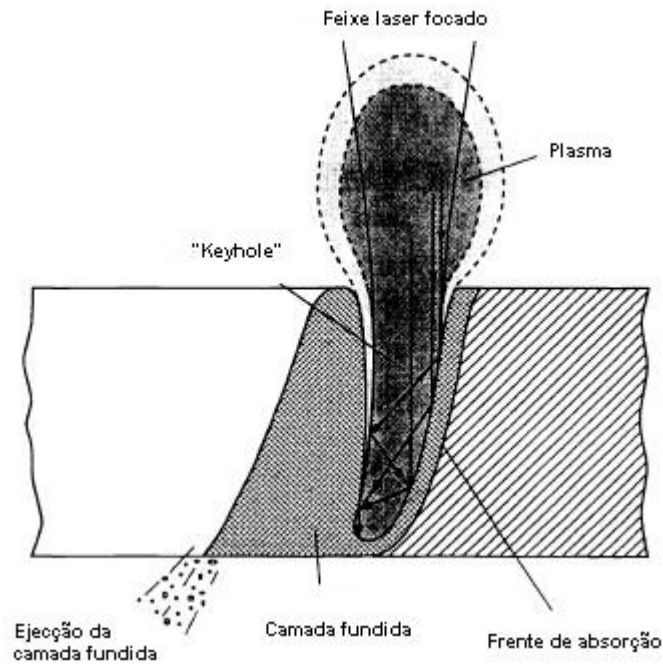


Fig. 27 – Mecanismo do corte de alta velocidade [1]

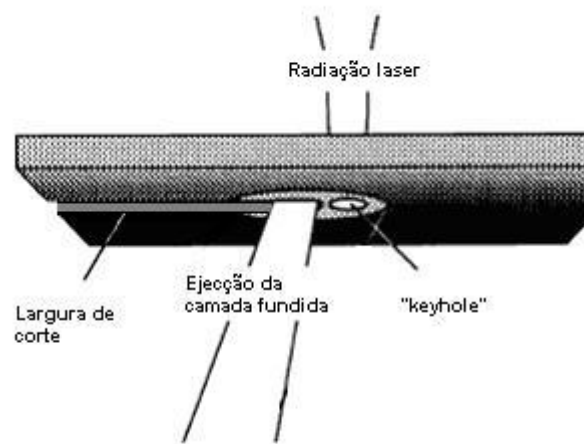


Fig. 28 – Formação do "keyhole" em corte de alta velocidade [1]

A terceira diferença mais importante em relação ao corte convencional por fusão, é o mecanismo de transferência de energia para a peça a cortar. Enquanto no corte por fusão, a energia é transferida pela absorção da superfície (absorção de Fresnel), o que significa que a porção de energia não absorvida é reflectida para fora da zona de interacção, no corte de alta velocidade, verifica-se uma absorção extra, originária da transmissão, por reflexões múltiplas, da energia reflectida pela frente de corte para as paredes do capilar. Além disto, o feixe é parcialmente absorvido no metal vaporizado e

devido à alta densidade de energia ($>5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$), este aquece até à formação de plasma. Isto quer dizer que a entrega de energia é maior do que a verificada em corte convencional devido a reflexões múltiplas e absorção do plasma [1]. Algumas medições de temperatura efectuadas na superfície de metais sob condições de plasma indicaram, que existe deposição de energia térmica 3 a 10 vezes superior comparando com radiação laser contínua [38].

Este trabalho procurou actualizar o trabalho inicialmente desenvolvido por Preißig *et al* [1], devido ao enorme interesse industrial que desperta. A crescente procura dos equipamentos de corte laser por parte das diversas indústrias, tem levado a um rápido desenvolvimento dos equipamentos. Num mercado global, como aquele que vivemos na actualidade obriga a um contínuo esforço no sentido de melhorar a produtividade, minorando custos de produção e aumentando cadências de produção. Daqui se conclui da pertinência e necessidade de um aprofundamento do conhecimento das características do corte de alta velocidade.

3. Capítulo III – Experimentação

3.1. *Materiais utilizados*

Um dos pressupostos subjacentes a este trabalho foi o de se centrar em aplicações industriais concretas. Nesse sentido, a selecção dos materiais utilizados na parte experimental deste trabalho recaiu sobre os materiais metálicos mais usualmente processados por estes equipamentos, como sejam os aços não ligados e de baixa liga, com ou sem revestimento, os alumínio e os aços inoxidáveis. Menos comuns são o titânio, as ligas de níquel e as ligas de cobre [27].

O aço é o principal material que é cortado por laser devido ao largo volume de aplicações industriais e porque é cortado muito facilmente.

No entanto, no sentido de otimizar a performance e a qualidade de acabamento, alguns fabricantes mundiais de chapa têm-se dedicado ao desenvolvimento de chapas de aço “próprias para corte laser”. Os fabricantes anunciam ganhos de velocidade da ordem dos 5 a 20%, garantindo uma melhor qualidade de corte. Um dos factores chave que marca a diferença entre estes aços e os aços comuns é uma composição química correcta, com particular incidência nos baixos teores de enxofre e silício, que são prejudiciais ao corte. Outras características são a óptima planeza (tolerância especial (FS)), baixas tensões internas e qualidade uniforme ao longo da chapa [51-53].

O alumínio ocupa o segundo lugar em termos de volume de aplicações de corte por laser. No entanto, o número de aplicações de alumínio cortado por laser continua a crescer, graças sobretudo à indústria automóvel. Os alumínio predominantes nessa indústria são da série AISI 5000 (fáceis de soldar) e AISI 6000 (fáceis de conformar). Ambas podem ser cortadas por laser com igual performance [27].

Quando exposto à atmosfera, o alumínio é oxidado, formando uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) que impede a progressão da corrosão. Este mesmo filme também impede que haja reacção efectiva alimentada por oxigénio. Por este motivo, usa-se por vezes o ar comprimido como gás de assistência, devido ao menor custo. Este filme de óxido tem uma temperatura de fusão muito alta, o que faz com que seja muito mais difícil obter um corte limpo. O mais habitual é o corte com azoto, pois assim é evitada a formação do óxido e assim a temperatura de solidificação passa a ser a do alumínio, a qual é muitíssimo mais baixa [54].

Quanto aos aços inoxidáveis, o laser é uma ferramenta adequada para o seu processamento. Na medida em que o aço inoxidável não reage com o oxigénio da forma eficaz como faz com o aço ligado, devido à camada passiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) que isola eficazmente o ferro do escoamento de oxigénio, a reacção exotérmica é inibida. O mais normal é que o corte deste material seja feito com azoto. São frequentemente cortados aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos (da série 400) bem como austeníticos (da série 300). Nestes últimos, a presença do níquel afecta o resultado do corte. A elevada viscosidade e tensão superficial do níquel fundido dificulta a remoção do material favorecendo a adesão de rebarba [54].

Nos ensaios realizados neste trabalho foram usados os seguintes materiais:

- Aço não ligado, cuja designação comercial é Racold Laser (DC03 optimizado / Am EN10130), na espessura de 1mm
- Aço St 37, na espessura de 2mm
- Alumínio AISI 5754, na espessura de 1 e 2 mm
- Aço inoxidável AISI 304, na espessura de 1 e 2 mm

No sentido de explorar o corte de alta velocidade, foram seleccionados diferentes gases de assistência de entre os mais utilizados na indústria. Assim testaram-se oxigénio (O_2) de qualidade laser (Air Liquide Lasal 2003), azoto (N_2) de qualidade laser (Air Liquide Lasal 2001) e argon [55].

3.2. Equipamento utilizado

Os ensaios foram efectuados num centro de corte por laser do fabricante português Adira, modelo CCL 3015 (Fig. 29), equipado com um gerador laser do tipo slab do fabricante Rofin Sinar com 3500 W (Fig. 30), modelo DC035, com possibilidade de operação em modo contínuo ou pulsado.



Fig. 29 – Centro de corte por laser CCL3015 do fabricante português Adira

Este gerador origina um feixe polarizado a 45° com cerca de 22mm de diâmetro e um modo TEM_{00} , com $K=0,9$. A qualidade do modo é devida à geometria da cavidade e a um filtro espacial que impede a saída da radiação para além da gaussiana.



Fig. 30 – Aspecto geral do gerador slab DC035 do fabricante Rofin Sinar

A qualidade do feixe foi avaliada experimentalmente fazendo uma impressão em acrílico (Fig. 31).



Fig. 31 – Impressão do modo do feixe em acrílico

O feixe é gerado com uma secção rectangular, a qual é convertida em circular, através de um sistema óptico, como mostrado na Fig. 32.

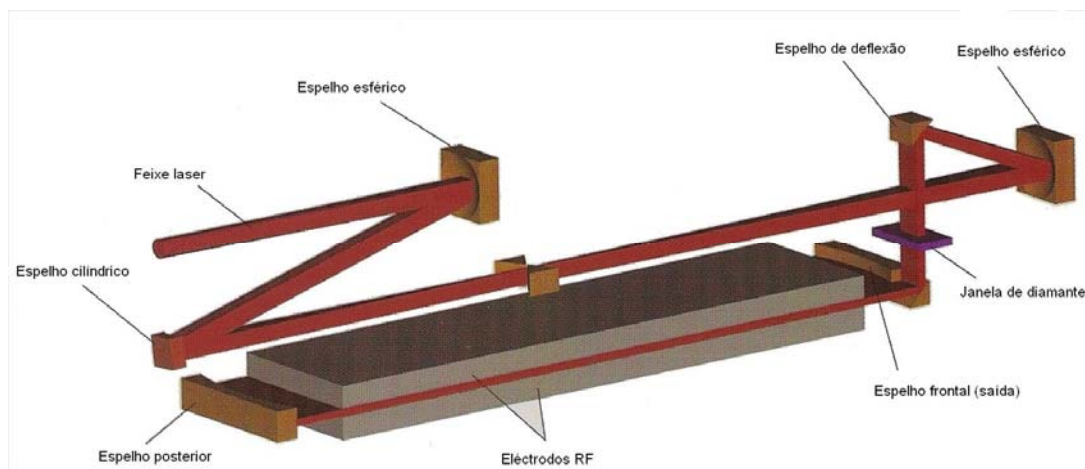


Fig. 32 – Transformação da geometria do feixe laser

O feixe é orientado até à chapa por intermédio de três espelhos de cobre, dois dos quais não revestidos, arrefecidos indirectamente por água. O primeiro espelho tem um revestimento que faz retenção de fase de 90° , polarizando assim o feixe circularmente. O último elemento óptico é uma lente de menisco de ZnSe, com uma distância focal de 5", que foi usada em todos os ensaios, colocada no interior da cabeça de corte. A cabeça estava equipada com um sensor óptico, colocado acima da lente, composto por um conjunto de foto-detectores, capaz de medir a irradiância do plasma formado na zona de interação feixe/material (Fig. 33).

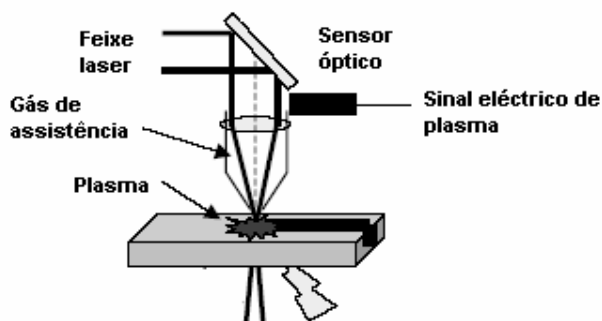


Fig. 33 – Esquema ilustrativo do mecanismo de detecção de plasma

Com o sinal proveniente do sensor é possível monitorizar o processo de corte. Por exemplo, no caso de ser recebido um sinal de plasma considerado excessivo, pode ser accionada alguma medida preventiva, como uma redução de velocidade ou mesmo paragem da máquina. Outra aplicação possível é na perfuração de chapa grossa, em modo pulsado. Uma perfuração deste tipo, em chapa de 20mm, pode demorar 25 a 30 segundos. Com este sistema, assim que a perfuração esteja completa, o sinal de plasma decresce e pode ser dada ordem para o começo do corte.

O ajuste da posição do ponto focal é programável e o movimento é executado de forma motorizada, através do comando numérico. A determinação da cota vertical do ponto focal é feita automaticamente. O valor “zero” para a posição do ponto focal significa que este está colocado 1mm abaixo da extremidade inferior do bico de corte, independentemente do “*stand-off*” (distância do bico de corte à chapa). Ou seja, o ponto focal está sobre a superfície da chapa quando a distância do bico à chapa é de 1mm.

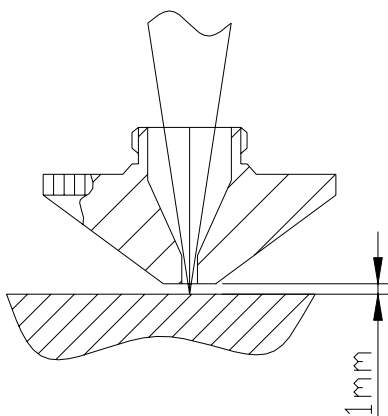


Fig. 34 – Posição “zero” do ponto focal

O centro de corte dispõe de quatro eixos, movidos por intermédio de motores lineares controlados por um comando numérico Siemens Sinumerik 840 D. Estes motores permitem uma velocidade máxima de deslocamento de 200 m/min e uma aceleração máxima de 2g para os eixos X e Y (Fig. 35).

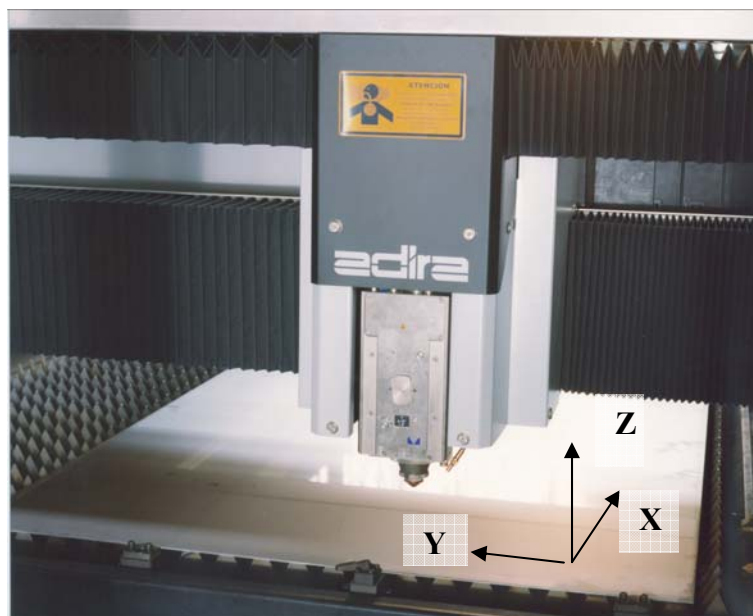


Fig. 35 – Direcção dos eixos

A Tabela 2 resume algumas das características gerais do equipamento utilizado.

Modelo de máquina	ADIRA CCL 3015 DC035
Dimensão máxima da chapa (mm)	3.000 x 1.500
Curso do eixo X (mm)	3.050
Curso do eixo Y (mm)	1.525
Curso do eixo Z (mm)	125
Velocidade de posicionamento em X (m/min)	200
Velocidade de posicionamento em Y (m/min)	200
Velocidade interpolada (X e Y) (m/min)	280
Velocidade de posicionamento em Z (m/min)	120
Aceleração máxima ($m \cdot s^{-2}$)	20
Repetibilidade (mm)	0,02
Precisão de posicionamento (mm)	0,05
Dimensões (C x L x A) (mm)	9.000 x 6.000 x 2.200
Peso aproximado (Kg)	18.000
Potência máxima do feixe laser (W)	3.500
Modo do feixe	TEM ₀₀
Diâmetro do feixe (mm)	22
Espessura máxima em corte por fusão reactiva (aço não ligado) (mm)	20
Espessura máxima em corte por fusão (AISI 304) (mm)	16

Tabela 2 - Características gerais do equipamento

3.3. Plano experimental realizado

Existe literatura abundante sobre a influência do plasma no corte por laser. Horisawa *et al* [31] estudaram a correlação entre o plasma e a qualidade de corte, usando ar comprimido como gás de assistência e um substrato de aço não ligado. Nesse estudo, em condições de velocidade superior àquela para a qual se obtinha um corte ótimo, a intensidade luminosa subia abruptamente, o plasma tinha uma cor azulada emitindo no comprimento de onda de 427 nm e o ponto de formação de plasma deslocava-se da superfície inferior para a superfície superior da chapa, ao longo da linha da frente de corte.

Preißig *et al* [1] desenvolveram um modelo de corte com plasma em que foi atingida uma velocidade de 280 m/min em chapa de zinco de 0.2 mm de espessura. Embora os resultados deste trabalho sejam aliciantes, não parece existir muito mais trabalho neste campo específico. Aproveitando os recentes melhoramentos substanciais verificados nos geradores de feixes laser, nomeadamente o aumento de potência conjugado com o aumento do número K, existe espaço para mais desenvolvimentos neste campo.

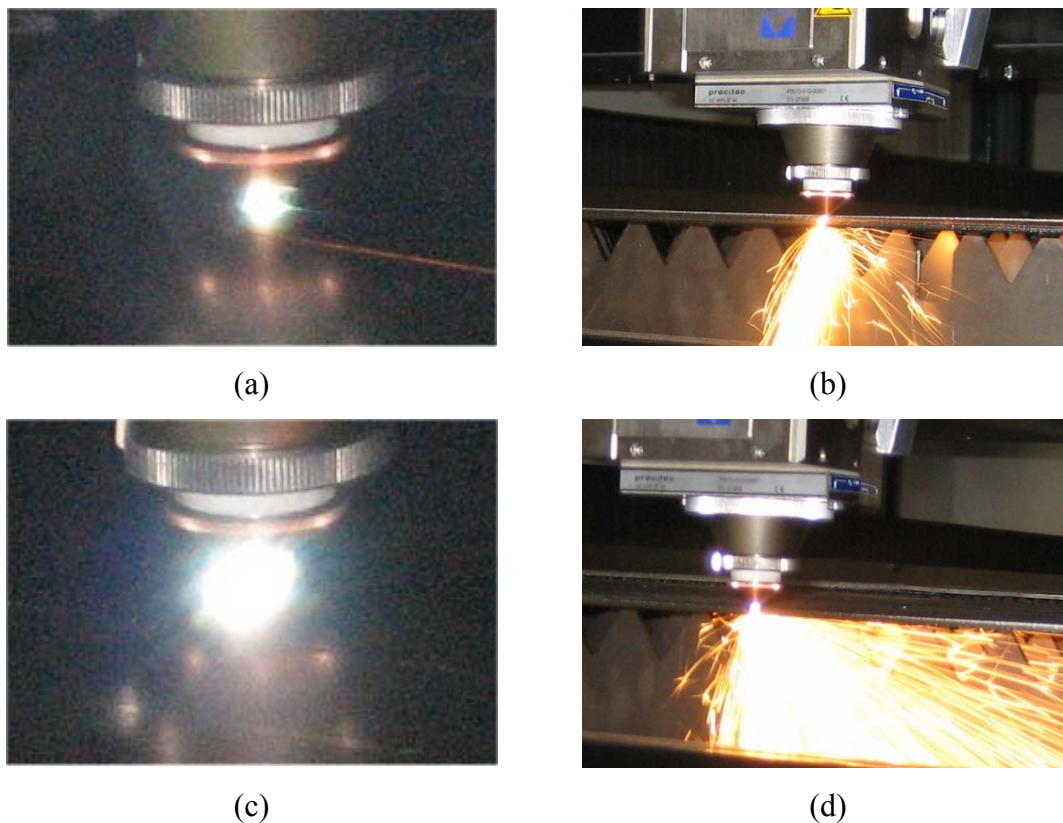


Fig. 36 – Corte por fusão (a, b) vs corte por plasma (c, d)

Neste trabalho, foram realizados ensaios utilizando o mesmo modelo que é referido em [1], mas vocacionados para aplicações industriais.

Tonshoff *et al* [2] referem ser possível o corte com plasma de metais até 1 mm de espessura. Foram feitos neste trabalho ensaios em espessura de 2mm, embora com potência e factor de qualidade do feixe superiores.

Como já foi referido, pretendeu-se numa primeira fase estabelecer o limite máximo de velocidade de corte e em que condições tal é alcançável. Existem diversos parâmetros que podem condicionar a velocidade de corte máxima, em qualquer mecanismo de corte por laser. Esses parâmetros são discutidos no ponto 3.3.1.

3.3.1 Condições iniciais de ensaio

Os parâmetros que afectam o corte por laser englobam, entre outros, a potência, a distância focal da lente de focalização, a posição do ponto focal, o tipo de gás de assistência e a pressão, o diâmetro do orifício do bico de corte, a distância do bico à peça e a velocidade de corte. De entre estes existe um conjunto de parâmetros que são fixados, como sejam: a potência, a distância focal de lente, a pressão do gás, o bico de corte (tipo e diâmetro) e a distância do bico à peça. Na Tabela 3 resumem-se os parâmetros fixados.

	Espessura: 1mm Materiais: DC03, AISI 304, AISI 5754	Espessura: 2mm Materiais: DC03, AISI 304, AISI 5754
Potência (W)	3500	3500
Distância focal (")	5	5
Diâmetro do feixe (mm)	22	22
Diâmetro teórico do ponto focal (mm)	0,09	0,09
Densidade de potência (W/cm ²)	5,47 x 10 ⁷	5,47 x 10 ⁷
Tipo de gás	N ₂ , O ₂ , Ar	N ₂ , O ₂ , Ar
Pressão do gás (bar)	5	8
Tipo de bico de corte	Convergente - paralelo	Convergente - paralelo
Diâmetro do bico de corte (mm)	1.5	1.5
Distância do bico à chapa ("stand-off") (mm)	1	1

Tabela 3 - Parâmetros de corte iniciais

Em relação à potência, esta foi estabelecida no valor máximo disponível, isto é, 3500 W de modo a ter uma densidade de potência mais elevada.

A selecção da distância focal tem de satisfazer o compromisso entre a obtenção de um ponto focal de pequeno diâmetro, para obter uma elevada densidade de potência, e simultaneamente uma profundidade de foco suficientemente grande para tolerar variações da posição do ponto focal em relação à chapa. Assim a lente seleccionada tem uma distância focal de 5", e uma geometria do tipo menisco, a qual permite tolerar melhor aberrações esféricas e para a mesma distância focal, obter o ponto focal de menor diâmetro.

O feixe laser emitido pela fonte utilizada, tem 22mm de diâmetro e um modo TEM₀₀.

Após a determinação da potência, diâmetro do feixe, modo transversal electromagnético, geometria da lente e distância focal, é possível estimar o diâmetro do ponto focal e com este, a densidade de potência. O diâmetro do ponto focal é calculado através da soma de duas parcelas:

$$d := d_{\text{dif}} + d_{\text{aber}} \quad \text{Eq. 6}$$

em que d_{dif} refere-se à componente de difracção e d_{aber} refere-se à componente de aberração. A componente de difracção é dada por:

$$d_{\text{dif}} := \frac{4 \cdot \lambda \cdot M^2 \cdot F}{\pi} \quad \text{Eq. 7}$$

em que λ é o comprimento de onda, M^2 refere-se à qualidade do feixe e assume o valor 1 para um modo TEM₀₀ e F é dado por:

$$F := \frac{f}{D} \quad \text{Eq. 8}$$

em que f é a distância focal e D é o diâmetro do feixe.

A componente de aberração é dada por:

$$d_{\text{aber}} := k \cdot \frac{f}{F^3} \quad \text{Eq. 9}$$

em que k é um factor relacionado com a geometria da lente, e toma o valor de 0,0187 para uma lente de menisco.

No caso concreto em estudo, no ponto focal, o feixe tem o diâmetro teórico de 0,09 mm.

A densidade de potência é dada por:

$$P_d := \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Substituindo os valores na Eq. 10, determina-se a densidade de potência que é de $5,47 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$.

A profundidade de foco (definição 5%) é dada por:

$$\Delta Z := \frac{d^2}{4 \cdot M^2 \cdot \lambda} \quad \text{Eq. 11}$$

Substituindo valores na Eq. 11, determina-se a profundidade do foco que é de 0,384 mm, correspondendo a 38% da espessura de chapa de 1mm e 19% da espessura de uma chapa de 2mm.

Em corte por fusão, o ponto focal é colocado geralmente na metade inferior da chapa. Em relação à posição do ponto focal, sabe-se que o seu diâmetro à superfície determina a intensidade de potência, e se a perfuração se efectua com sucesso ou não. Karatas *et al* [56] estudaram a influência da posição do ponto focal na dimensão da largura de corte e na formação de estrias, em corte de chapas de aço não ligado com oxigénio. No entanto, para corte com plasma, não está estabelecido na literatura qual é a posição do ponto focal mais favorável. Nas Fig. 37 e Fig. 38, são mostrados mapas qualitativos da variação da qualidade de corte com alguns parâmetros. Esses mapas dão

indicações aproximadas para os resultados de corte esperados com uma posição do ponto focal igual a $-0,5\text{mm}$ [57]. Por não haver dados suficientes disponíveis na literatura, este parâmetro foi variado nos ensaios desenvolvidos neste trabalho.

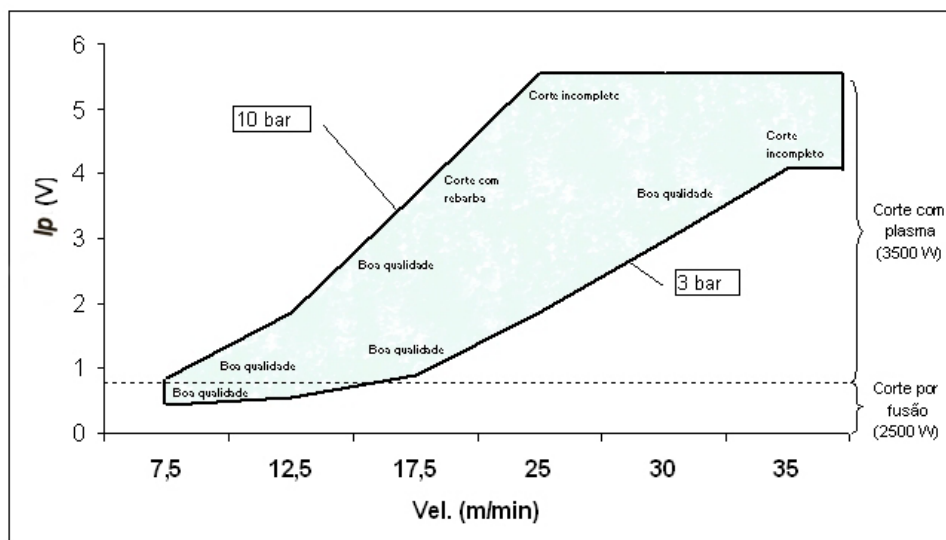


Fig. 37 – Mapa de influência de parâmetros na qualidade de corte [57]

Material: aço não ligado DC03;

Espessura: 1 mm;

Gás: N_2 ; Posição do ponto focal: $-0,5$ mm

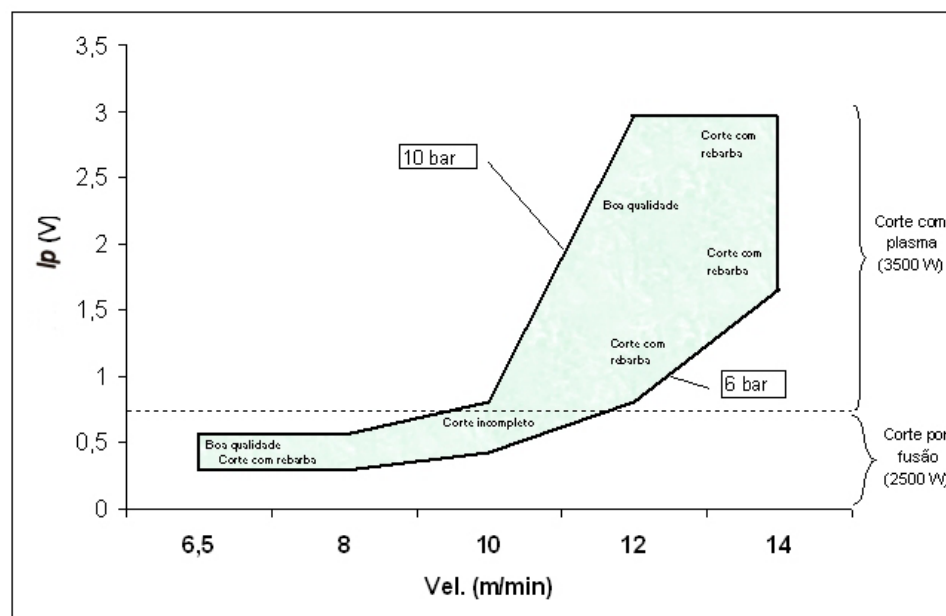


Fig. 38 - Mapa de influência de parâmetros na qualidade de corte [57]

Material: aço não ligado DC03

Espessura: 2 mm

Gás: N_2 ; Posição do ponto focal: $-0,5$ mm

Quanto ao tipo de gás de assistência, o oxigénio, o azoto e o árgon são os gases mais frequentemente usados em corte por laser. Nas condições de ensaio, com densidade de potência da ordem dos $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, é possível fazer deflagrar um plasma com qualquer um dos três gases referidos. No caso do oxigénio, há que considerar adicionalmente a existência de uma reacção exotérmica. Assim, os testes foram realizados para cada um dos gases. No caso do aço inoxidável, este não foi cortado com oxigénio, pois o corte deste material com este gás, tem cada vez menos interesse industrial. Uma das grandes vantagens da tecnologia do corte por laser é o facto de se poder produzir peças sem necessidade de acabamento posterior. Em particular as peças de aço inoxidável, que vulgarmente são usadas para efeitos decorativos ou são colocadas à vista por causa das boas características anti-corrosão, exigem muitas vezes uma superfície de corte com óptimo acabamento. O corte de aço inoxidável com oxigénio anula em parte essa mais valia pois a superfície fica oxidada para além de ficar rugosa e com deficiente acabamento.

Em relação à pressão, foi já referida a influência importante que tem no desenvolvimento do plasma. No entanto, essa influência nem sempre é determinante. Existe uma gama restrita de valores para os quais o corte por plasma não é muito significativamente afectado pela pressão e é precisamente nessa gama restrita que é possível fazer esse tipo de corte em boas condições [57]. Nas Fig. 37 e Fig. 38 é visível que o corte com boa qualidade para 1 mm se dá para pressões baixas, com limite mínimo de 3 bar. No caso da espessura de 2 mm, vê-se na Fig. 38, que o corte com boa qualidade se dá para pressões um pouco mais altas, na proximidade dos 10 bar. Por este motivo, foram escolhidos os valores de 5 bar para o caso de 1mm, e 8 bar para o caso dos 2 mm de espessura.

O bico de corte usado foi do tipo convergente – paralelo com um diâmetro do orifício de 1,5mm, habitualmente usado para o corte por fusão. Relativamente à distância do bico à chapa, esta foi mantida por um sensor do tipo capacitivo incorporado na cabeça de corte, como se mostra na Fig. 39. O sensor mede o potencial eléctrico entre o bico de corte e a chapa o qual depende da distância entre eles. Para isolar o bico de corte do resto da cabeça, o sinal é conduzido pelo interior de uma peça cerâmica. Em caso de colisão violenta do bico com algum obstáculo, a peça cerâmica quebrar-se-á mantendo-se assim a integridade dos restantes órgãos. O sistema só funciona de forma eficaz com chapa metálica ou outro material condutor. Para materiais não condutores é possível utilizar-se um apalpador mecânico para seguir a irregularidade da chapa. No

corte por fusão, em chapa fina, a distância do bico à chapa é habitualmente de 0,5mm. No entanto, no corte de alta velocidade, pode ser vantajosa uma distância do bico à chapa superior. Yilbas *et al* [46] detectaram a ejeção de partículas líquidas provavelmente provenientes da nucleação de bolhas de vapor na zona líquida. Semak *et al* [28], também referem a ejeção de matéria líquida pelo efeito da pressão de expulsão provocada pela vaporização do metal. Os mesmos autores apontam uma velocidade de ejeção de matéria líquida da ordem 40 m/s para uma intensidade de potência de 5×10^6 W/cm², em substrato de ferro. Na tentativa de minorar a adesão de partículas de sujidade na lente, foi seleccionado um valor superior para a distância do bico à chapa. Qualquer partícula de sujidade diminui a transmissividade da lente, aumentando a absorção por parte do seu substrato. Este aumento da absorção provoca o aquecimento da lente, e consequentemente a sua deformação, levando ao efeito de “thermal lensing”, conhecido e descrito na literatura [8, 27, 58]. O arrefecimento da lente é feito pelo gás de assistência na zona central e por água na zona periférica. Um feixe com modo TEM₀₀ aumenta a sensibilidade a este fenómeno, pois a concentração de energia no centro da lente provocada pela distribuição gaussiana conjugada com o tipo de arrefecimento referido provoca um gradiente térmico mais pronunciado, logo, uma maior deformação.



Fig. 39 – Sensor capacitivo e peça cerâmica

Outro motivo pelo qual se optou por uma distância do bico à chapa superior aos valores convencionais existentes na literatura [8, 11, 27, 49] foi para evitar colisões entre o bico e a peça devido às elevadas velocidades de processamento. O eixo Z, no equipamento utilizado, não tem capacidade dinâmica para manter a distância do bico à chapa, na presença de velocidades de processamento tão elevadas. As colisões entre o bico de corte e a chapa provocam a deterioração prematura do bico de corte.

Por outro lado, a distância do bico à chapa também condiciona o escoamento do gás. As características do escoamento de gás para corte por fusão estão perfeitamente estabelecidas e existe numerosa literatura sobre esse assunto. Entre 0.5 e 1.5 mm, em corte por fusão, o escoamento não sofre alterações muito críticas [7, 27, 59-61]. No entanto, no mecanismo de corte estudado neste trabalho, como já foi visto em 2.5, o escoamento apresenta um modelo hidrodinâmico distinto, pelo que os pressupostos não podem ser os mesmos.

A velocidade é outra variável a estudar neste trabalho, a qual se pretende otimizar para o máximo valor utilizável em condições industriais.

Na primeira fase de testes, efectuaram-se cortes em diferentes materiais e espessuras tendo como variáveis o tipo de gás, a velocidade de corte e a posição do ponto focal e tendo como objectivo a optimização da velocidade de corte com o menor detrimento de qualidade possível.

Para melhor compreender a influência do plasma no corte, estabeleceram-se padrões de comportamento relativo, de forma qualitativa, entre a formação de plasma e as respectivas condições de corte, nomeadamente com a velocidade e com a posição do ponto focal. Em relação à primeira, sabe-se que em geral um aumento da velocidade de corte provoca um plasma mais intenso [2, 30, 31, 43]. No entanto, no caso do corte com formação de plasma, não se sabe bem qual a influência da posição do ponto focal na qualidade do corte. Segundo Tonshoff *et al* [2] e conforme já demonstrado em 2.4.2, o plasma forma-se na zona de interacção do feixe com a matéria. Sabe-se também, como já foi referido, que a propagação do feixe é alterada pela pluma, causando variações no ponto focal [45]. Além do mais, a pluma gera um campo eléctrico que perturba o sensor capacitivo que regula a distância do bico à chapa. Quanto maior for essa distância menor é a corrente do plasma [22, 23]. Como é evidente, uma variação da distância do bico à chapa implica uma alteração da posição do ponto focal. Uma vez que, para o corte de alta velocidade, não se sabe qual é a posição óptima para o ponto focal pelo motivo de que ela vai influenciar a formação do plasma, a posição do ponto focal é um parâmetro de processamento a determinar.

O sistema de monitorização do plasma é composto por um sensor óptico e um circuito de tratamento de sinal eléctrico, patenteado pelo fabricante Precitec [62, 63]. Segundo a descrição destas patentes, a radiação proveniente da área de observação é detectada por um receptor sensível à radiação que converte a radiação detectada num sinal eléctrico que por sua vez é filtrado num circuito de processamento de sinal por

forma a que possam ser detectadas variações rápidas e/ou curtas na intensidade da radiação detectada. A Fig. 40 mostra a curva de calibração do sensor óptico. Este sistema está inserido na cabeça de corte do fabricante Precitec, modelo HP1.5M. Este sistema é baseado no de Jurca, patenteado em 1990. A invenção de Jurca consistia num método de detecção da radiação emitida pelo plasma nos comprimentos de onda de 200 nm a 450 nm usando um foto-díodo, por forma a que, partindo das características radiativas do plasma, se pudesse controlar a eficiência do acoplamento do feixe à peça, bem como verificar os valores limites dos parâmetros de processamento tais como potência, qualidade do feixe, desfocagem, alimentação do gás de assistência, etc. [21].

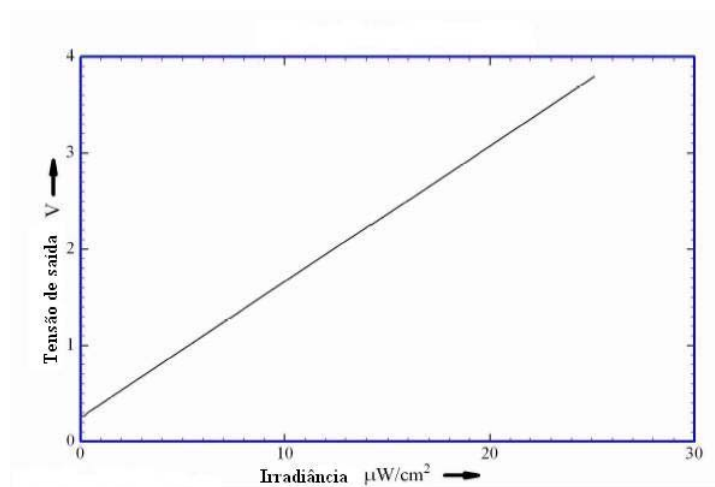


Fig. 40 - Curva de calibração do sensor óptico de plasma

A par da monitorização do plasma, foram também monitorizados o sinal do sensor capacitivo e a posição da cabeça de corte segundo o eixo Z. Esta monitorização visa a identificação de perturbações no corte provocadas por variação da distância do bico à peça. No entanto, é difícil isolar a variação da distância do bico à chapa provocada pela formação de plasma da provocada por ondulação de chapa.

Como o objectivo é determinar a velocidade máxima utilizável em condições industriais, foi seguida uma metodologia de ensaio que consistiu em duas fases distintas:

- a) na primeira fase, partindo de valores pré-definidos para a posição do ponto focal mostrados nas Fig. 37 e Fig. 38, foi caracterizada a irradiância do plasma em função da velocidade. Esta última foi variada

de forma contínua até ao valor máximo programado. Com os dados obtidos sobre o comportamento do plasma, foram determinados valores discretos de velocidade e valores para a posição do ponto focal mais adequados para a segunda fase, sem ter sido feita qualquer avaliação da qualidade de corte;

- b) na segunda fase, usando os valores de velocidade e posição do ponto focal determinados na primeira fase, foram realizados novos ensaios e avaliada a qualidade de corte;

Os ensaios correspondentes à primeira fase estão descritos em 3.3.2 e os correspondentes à segunda fase estão descritos em 3.3.3.

Em todos os ensaios foram monitorizadas, em tempo real, as seguintes variáveis,:

Posição da cabeça segundo o eixo Z

S - sinal analógico do sensor capacitivo (“offset” ou “standoff”)

v - velocidade de deslocamento (eixo Y)

a - aceleração do eixo (eixo Y)

I_p – irradiância do plasma obtido por leitura directa do sensor de plasma

p - pressão do gás de assistência

3.3.2 Primeira fase de ensaios - Caracterização da interacção entre irradiância do plasma, velocidade e posição do ponto focal

Para a realização da primeira fase de ensaios, foi seleccionada uma gama razoavelmente ampla de valores para posição do ponto focal, tendo em conta valores típicos usados vulgarmente no corte por laser. Quanto à velocidade de corte foi escolhido um valor máximo à partida inatingível. O objectivo foi provocar uma situação de extinção do corte, para definir os limites para cada experimentação. De forma a evidenciar a evolução da irradiância do plasma em função da velocidade, procurou-se que esta crescesse lentamente e nesse sentido, foi programada uma aceleração muito baixa. Assim o corte iniciou-se com uma velocidade gradualmente crescente atingindo ou não o valor máximo programado, ao mesmo tempo que foi monitorizada a irradiância do plasma. Foi também caracterizado outro aspecto, eventualmente

relevante: a sensibilidade do sistema plasma-velocidade, ou seja, saber se para diferentes posições do ponto focal, a variação da irradiância do plasma com a velocidade é sempre igual. A simples monitorização da irradiância do plasma, à medida que o corte é feito pode não ser fiável, pois já vimos que a aceleração é muito baixa, e como tal, pode filtrar alguns resultados. Para aferir esta possível variável, foi desenvolvido um método capaz de provocar uma perturbação no sistema e avaliar a sua resposta à perturbação. O princípio de funcionamento é o seguinte: o sensor óptico lê a irradiância proveniente do plasma. Se se impuser que a partir de um determinado valor de irradiância Pr , a máquina reduz instantaneamente a velocidade de um factor Pv , essa redução funcionará como perturbação, pois a irradiância do plasma tenderá a descer. Se esta última descer o suficiente para ser menor do que o valor Pr , então a velocidade subirá de novo. Este sistema permite avaliar a sensibilidade do plasma, para diferentes posições do ponto focal, em função da velocidade.

Resumindo: o ensaio consta de um corte linear na direcção Y, com uma extensão suficiente para permitir atingir a velocidade de corte máxima. O corte inicia-se com uma velocidade gradualmente crescente (conforme a aceleração programada) ao mesmo tempo que a irradiância é lida em tempo real. Se o seu valor exceder Pr , a velocidade é reduzida percentualmente para o valor programado em Pv . Se a irradiância for superior a Pp , a máquina interrompe o programa.

A limitação da irradiância admissível e consequente redução de velocidade funcionam como uma perturbação no sistema permitindo avaliar o seu comportamento. Com este procedimento foi possível determinar, para as condições experimentais usadas, algumas características em função da posição do ponto focal, como sejam:

- A velocidade de corte para a qual a irradiância é mínima;
- A evolução da irradiância em função da velocidade de corte;
- A sensibilidade da variação do plasma em função da velocidade de corte.

Após esta caracterização, cujos resultados são apresentados em 4.1, foi possível uma escolha mais selectiva dos valores de velocidade e posição do ponto focal para prosseguir com a optimização do corte, na segunda fase de ensaios.

3.3.3 Segunda fase de ensaios - Optimização do corte com plasma em condições industriais

Na segunda fase de ensaios, foram efectuados cortes em diversos provetes, com velocidade e posição do ponto focal diferentes identificados no conjunto de ensaios da primeira fase. Foi caracterizada a irradiância do plasma e avaliada a qualidade de corte, permitindo estabelecer as condições óptimas para utilização industrial.

Além dos materiais já referidos para a primeira fase foram executados ensaios também em aço inoxidável AISI 304, em espessuras de 1 e 2mm, dado este ser um dos materiais mais utilizados em corte por laser. Conforme explicado em 3.3.1, não foram feitos ensaios de corte de aço inoxidável assistido com O₂. Foi excluída a utilização de Ar, por ter sido concluído nos ensaios prévios que este gás não é adequado ao tipo de corte em estudo neste trabalho.

Os provetes têm a forma indicada na Fig. 41.

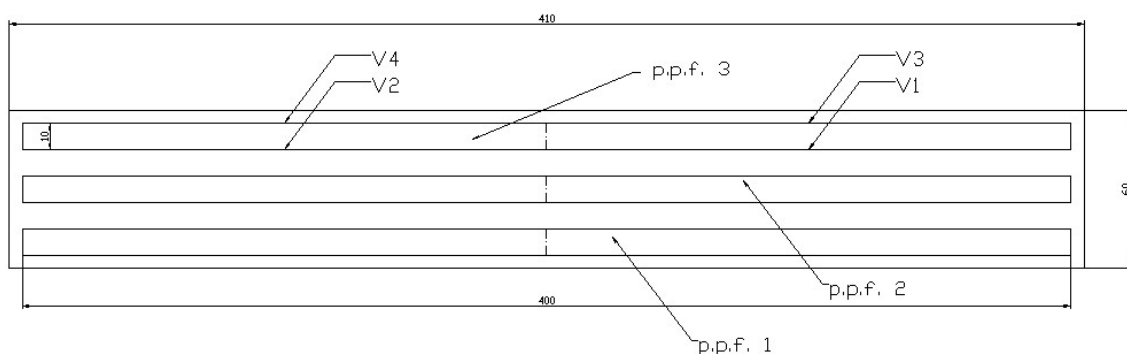


Fig. 41 - Esquema dos provetes de corte

Cada provete completo foi dividido em três rectângulos. Cada rectângulo correspondeu a uma posição do ponto focal diferente. Cada lado maior do rectângulo foi dividido em dois segmentos cada um correspondendo a uma velocidade diferente. Assim, foram testadas quatro velocidades e três posições do ponto focal diferentes. A irradiância do plasma foi monitorizada durante a execução do corte.

A caracterização por espectroscopia do plasma produzido está fora do âmbito deste trabalho, pelo que não foi considerada na experimentação.

3.3.4 Análise das superfícies de corte

De entre as superfícies de corte produzidas foram seleccionadas amostras para observação em microscopia óptica e medição de rugosidades. Seleccionaram-se para cada combinação material/espessura/gás de assistência, uma amostra que visualmente tinha boa qualidade e uma com má qualidade de acabamento de superfície.

As observações em microscopia óptica foram feitas com um microscópio LEITZ com ampliação de 52X.

As rugosidades foram medidas com um rugosímetro Mitutoyo Surftest 211, fazendo cinco medições em cada superfície, num comprimento de referência de 20mm. No caso das espessuras de 2mm, foram feitas cinco medições na metade superior e cinco medições na metade inferior da superfície de corte. Registaram-se os valores máximos, mínimos e médios de rugosidade R_z , tal que R_z é determinado por:

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad \text{Eq. 12}$$

Em que Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 e Z_5 são as rugosidades parciais.

4. Capítulo IV – Resultados e discussão

Embora, do ponto de vista teórico, os lasers de CO₂ não sejam os melhores para o processamento de metais pelo facto de estes apresentarem um comportamento altamente reflectivo ao comprimento de onda de 10,6 μm (ver Fig. 42), os lasers de CO₂ são os mais usados na indústria metalomecânica.

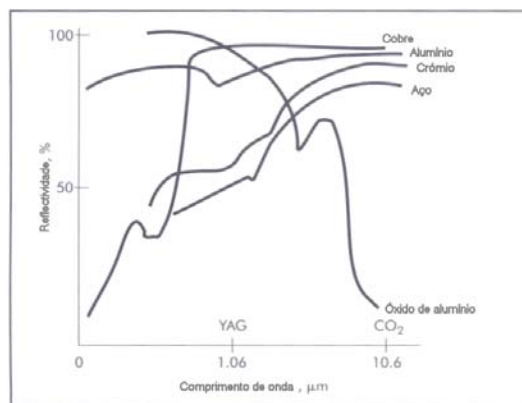


Fig. 42 - Reflectividade vs comprimento de onda [27]

Na verdade, à temperatura ambiente, a absorção da radiação incidente pode estar compreendida num intervalo de 10% até um valor tão pequeno quanto 0.5%. No entanto, a absorção de metais fundidos cresce muito rapidamente com o aumento da temperatura (Fig. 43). Em particular, quando a densidade de potência é suficientemente elevada para vaporizar o metal e formar plasma, a taxa de absorção eleva-se para cerca de 95% [54, 64].

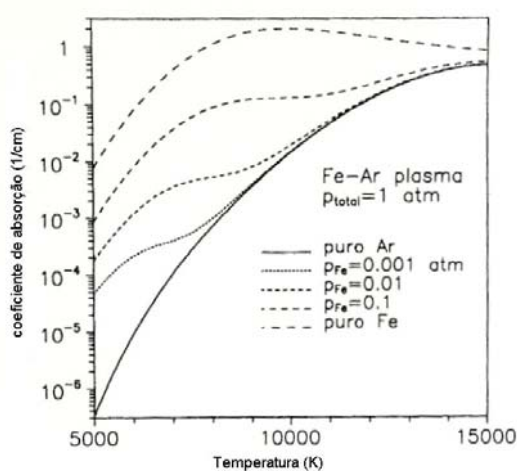


Fig. 43 - Coeficiente de absorção em função da temperatura, em atmosfera de argón [65]

Na Fig. 44 apresentam-se fotografias representativas dos mecanismos de corte por fusão (a) e de corte por plasma (b), de aço não ligado com azoto como gás de assistência.

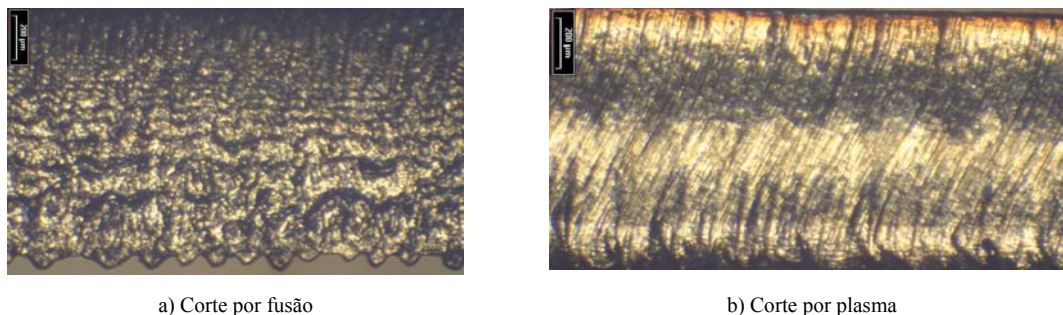


Fig. 44 – Macrografias da superfície de corte

Nas figuras é bem evidente a existência de mecanismos diferentes. A figura a) apresenta, de forma nítida, a evolução progressiva da camada fundida da superfície superior para a superfície inferior. Pode notar-se inclusivamente, a existência de pequenas gotículas aderentes à superfície inferior. Na figura b), a superfície apresenta um aspecto estriado onde não se vislumbra uma progressão da superfície superior para a inferior da chapa. Este aspecto da superfície pode dever-se ao movimento lateral do material fundido contra as paredes de corte, conforme explicado por Preißig *et al* [1] e citado neste trabalho no ponto 2.5.

4.1. *Primeira fase de ensaios - Caracterização da interacção entre irradiância do plasma, velocidade e posição do ponto focal.*

4.1.1 Ensaios em aço não ligado DC03 (EN 10130)

4.1.1.1. *Espessura de 1mm , com Azoto*

Na

Tabela 4 apresentam-se os parâmetros de corte laser usados para este ensaio. Como foi referido em 3.3.2, quando o sensor de plasma excede o valor programado em P_r (parâmetro referente ao valor de irradiância para a qual se verifica uma redução de velocidade), a velocidade de corte diminui de acordo com a percentagem programada em P_v (parâmetro de redução de velocidade). Isso explica a existência de picos e depressões nas velocidades medidas bem como nos valores de irradiância do plasma. A posição do ponto focal variou entre -2 e $+0.5$ mm, para a chapa de 1mm. No corte por laser convencional, o ponto focal é colocado no interior da chapa, geralmente na metade inferior. Assim, para uma chapa com 1 mm de espessura faz sentido experimentar pelo menos duas posições para o ponto focal: a meio da espessura e na superfície inferior. Inicialmente este estudo foi efectuado para essas posições e foi estendido a posições 1mm superiores e 1mm inferiores, com divisões de 0,5mm. A velocidade máxima foi estabelecida em 40 m/min, um pouco superior ao máximo contemplado na Fig. 37, no sentido de tornar a velocidade inatingível. O valor programado para P_p foi de 3,7 V, um pouco inferior aos 4 V, valor máximo para uma pressão de 3 bar, conforme também se pode ver na Fig. 37. A escolha do valor de P_r foi de 1,1 V, um pouco superior à fronteira entre os mecanismos de corte por fusão e o corte com plasma, diminuindo assim o risco do corte se processar sob o mecanismo de corte por fusão. A escolha destes valores foi baseada nos resultados obtidos num conjunto de ensaios preliminares, tendo-se apurado serem estes os melhores valores.

Gás	Tipo	N ₂
	Pressão	5 bar
	Caudal	7,2 m ³ /h
Diâmetro do bico		1,5 mm
Distância do bico à chapa		1 mm
Potência (CW)		3500 W
Velocidade		40 m/min
Aceleração		1 m.s ⁻²
P_r		1.1 V
P_p		3.7 V
P_v		50 %

Tabela 4 – Parâmetros de corte laser com N₂ para o aço não ligado

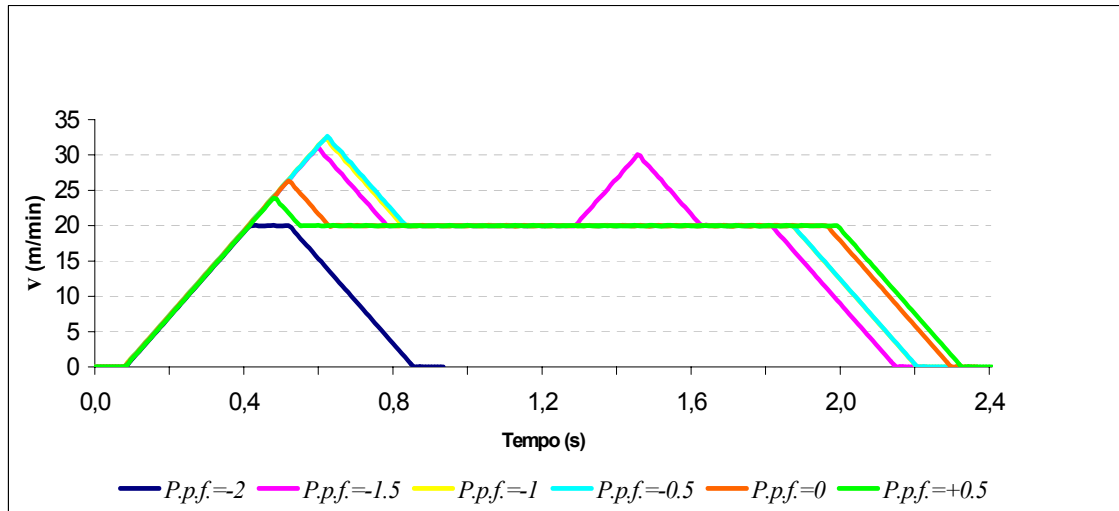


Fig. 45 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: aço não ligado; Espessura: 1mm; Gás: N₂

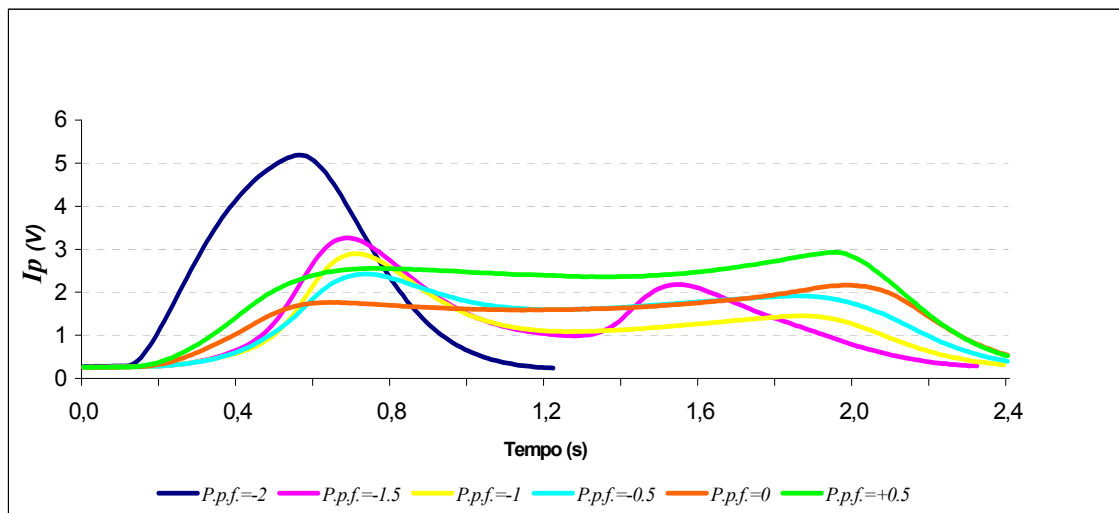


Fig. 46 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: aço não ligado; Espessura: 1mm; Gás: N₂

Na Fig. 45 e na Fig. 46 apresenta-se a evolução da velocidade e da irradiância ao longo do tempo, tendo como variável a posição do ponto focal ($p.p.f.$). Da observação destas figuras identificam-se quatro comportamentos distintos para $p.p.f. = -2, -1,5, 1$ e 0 . Assim verifica-se que:

- Para a $p.p.f. = -2$, atinge-se o valor de irradiância I_p mais elevado, excedendo o máximo admissível programado ($P_p = 3,7$ V), o que leva à extinção do corte.

- Para a $p.p.f. = -1.5$, o primeiro pico de plasma excede largamente o valor de 1,1 V programado para Pr , entrando em funcionamento a redução de velocidade, impedindo que se alcance o valor máximo de 40 m/min. Esta é a situação em que o plasma é mais sensível à variação de velocidade, levando ao aparecimento de um mínimo de plasma para $t=1,3$ s e a um segundo pico de velocidade de 30 m/min, para $t=1,5$ s.
- Para a $p.p.f. = -1$ é atingida a velocidade mais elevada e, tal como no caso anterior, observa-se um mínimo de plasma para $t=1,3$ s. No entanto, neste caso, o plasma é menos sensível à variação de velocidade, não ocorrendo um segundo pico, isto é, há um patamar de velocidade durante o restante tempo de corte.
- Para a $p.p.f. = 0$, o comportamento é muito amortecido, pois a curva de irradiância I_p é praticamente plana. O sistema é bastante insensível à velocidade. O corte é feito quase na totalidade com irradiância superior a Pr .

As restantes curvas, correspondem a situações intermédias, pelo que não são analisadas detalhadamente.

4.1.1.2. Espessura de 1 mm, com Oxigénio

Neste ensaio mantiveram-se todas as condições indicadas para o ensaio anterior com excepção do gás de assistência que neste foi o oxigénio.

No caso do corte de aço não ligado com oxigénio existe uma variável adicional que é a reacção exotérmica provocada pelo oxigénio. Embora não se tenha encontrado literatura que tratasse o problema do corte de alta velocidade com oxigénio, alguns autores estudaram o corte por fusão reactiva de aço não ligado com auxílio de oxigénio. Por exemplo, Karatas *et al* [56] estudaram a influência da espessura e da posição do ponto focal na dimensão da largura de corte e na formação de estrias, em corte de chapas de aço não ligado com oxigénio. Yilbas *et al* [66] estudaram o efeito combinado

da reacção química do oxigénio com o metal fundido, o efeito de arrefecimento do escoamento e a evaporação do metal durante corte com laser de CO₂. Yilbas [67] refere que a reacção exotérmica pode contribuir com 60% da energia disponível para o processamento de corte. Ainda o mesmo autor, fez uma caracterização experimental de corte por laser com oxigénio, tendo em conta a formação de plasma, mas sem discutir individualmente cada um dos mecanismos intervenientes no processo [68]. Existe pois, uma influência da ionização do gás na reacção exotérmica, para que a contribuição de energia dada pelo plasma possa ser isolada da energia fornecida pela reacção química. Embora este estudo esteja fora do âmbito deste trabalho, é de esperar contudo que a velocidade de corte máxima seja superior quando se utiliza oxigénio.

As Fig. 47 e Fig. 48 ilustram a evolução da velocidade e da irradiância ao longo do tempo, tendo como variável a posição do ponto focal. Tal como se esperava, a velocidade de corte é superior à obtida no corte com azoto. Para $t=0,66$ s, a velocidade máxima é de 34,7 m/min contra 32,2 m/min alcançada em corte com azoto, no instante $t=0,63$ s e para uma posição do ponto focal $p.p.f.=-0,5$ mm, traduzindo assim um acréscimo de velocidade de 7,7%.

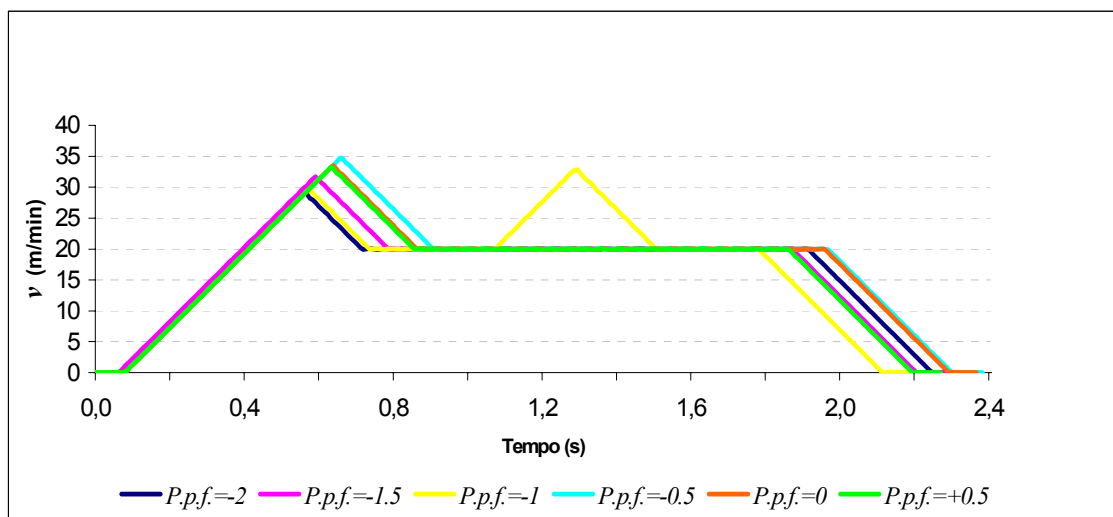


Fig. 47 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: aço não ligado; Espessura: 1mm; Gás: O₂

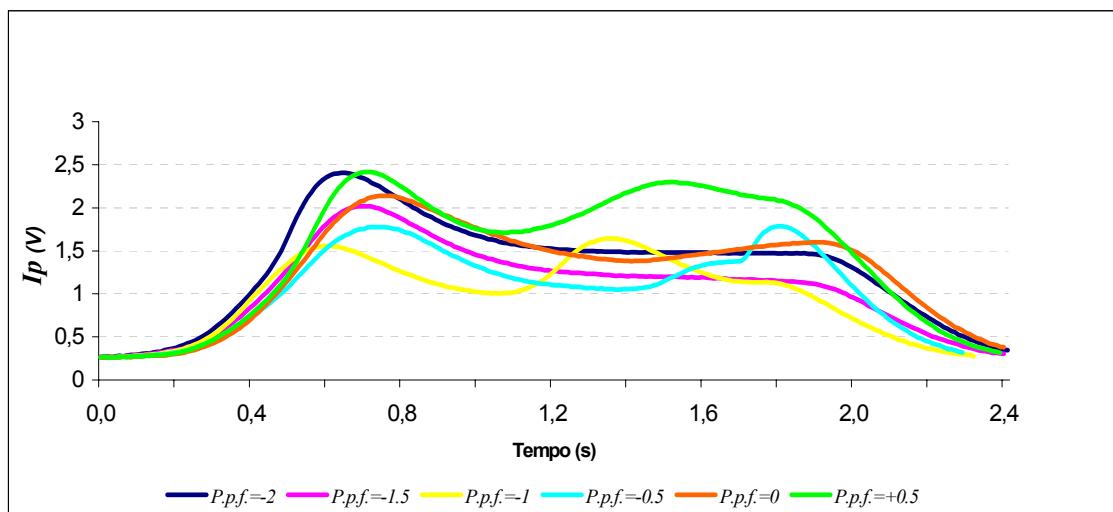


Fig. 48 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: aço não ligado; Espessura: 1mm; Gás: O₂

Ao mesmo tempo, analisou-se a irradiância. É notória a tendência para o aumento do nível de irradiância à medida que a posição do ponto focal evolui para valores positivos. A redução de velocidade provoca, inicialmente, um pequeno decréscimo para rapidamente se verificar de novo um aumento de irradiância, mesmo mantendo a velocidade constante.

Saliente-se que, tanto com oxigénio como com azoto, existe um pequeno desfasamento entre a velocidade e os valores lidos pelo sensor de plasma. Este desfasamento poderá dever-se unicamente a um atraso provocado pelo sensor. Para a mesma posição do ponto focal, os máximos alcançados são 2,55 V para o nível de irradiância em $t=0,73$ s para azoto, e 1,77 V em $t=0,74$ s para oxigénio. A comparação entre os níveis de irradiância não pode ser feita directamente, pois o sensor pode apresentar sensibilidade diferente para um diferente comprimento de onda da radiação proveniente do plasma. Alguns estudos espectroscópicos indicam a existência de espécies diferentes no plasma conforme o gás e o substracto usado, pelo que o comprimento de onda da radiação será diferente num caso e noutro [35-37]. Por este motivo, as leituras não são directamente comparáveis. No entanto, e ainda que apenas em termos qualitativos, a partir desta análise, a velocidade de corte com oxigénio é superior à velocidade de corte com azoto.

Da análise das figuras pode verificar-se ainda que:

- Para a $p.p.f. = -1,5$ - o comportamento da curva de irradiância é o mais constante, apresentando inicialmente um pico correspondente à velocidade máxima, para posteriormente se situar em valores sempre inferiores a 2 V.
- Para a $p.p.f. = -1$ - verifica-se um mínimo de irradiância I_p e, simultaneamente, a maior sensibilidade do sistema à variação de velocidade. É a única situação em que se verifica um segundo pico de velocidade.
- Para a $p.p.f. = -0,5$ - é alcançada a maior velocidade de corte, embora inferior ao valor máximo programado (40 m/min). Atendendo a que nesta situação a curva da irradiância I_p tem o menor declive, denotando menor sensibilidade à variação de velocidade, provavelmente o valor elevado de velocidade deve-se à lentidão do sistema em reagir à ordem de redução de velocidade dada por Pr . Nesta situação, o sistema apresenta a menor sensibilidade à variação de velocidade.
- Para a $p.p.f. = +0,5$ - a irradiância I_p cresce muito significativamente. A redução de velocidade inverte ligeiramente esta tendência, para logo a seguir se dar um aumento independente da velocidade.

As restantes curvas, correspondem a situações intermédias, pelo que não são analisadas detalhadamente.

4.1.1.3. Espessura de 1 mm, com Árgon

Os testes efectuados com árgon como gás de assistência permitiram concluir que este gás é menos adequado para o corte de alta velocidade do que os anteriores.

A Fig. 49 mostra as curvas de irradiância do plasma formado no corte de aço não ligado com árgon.

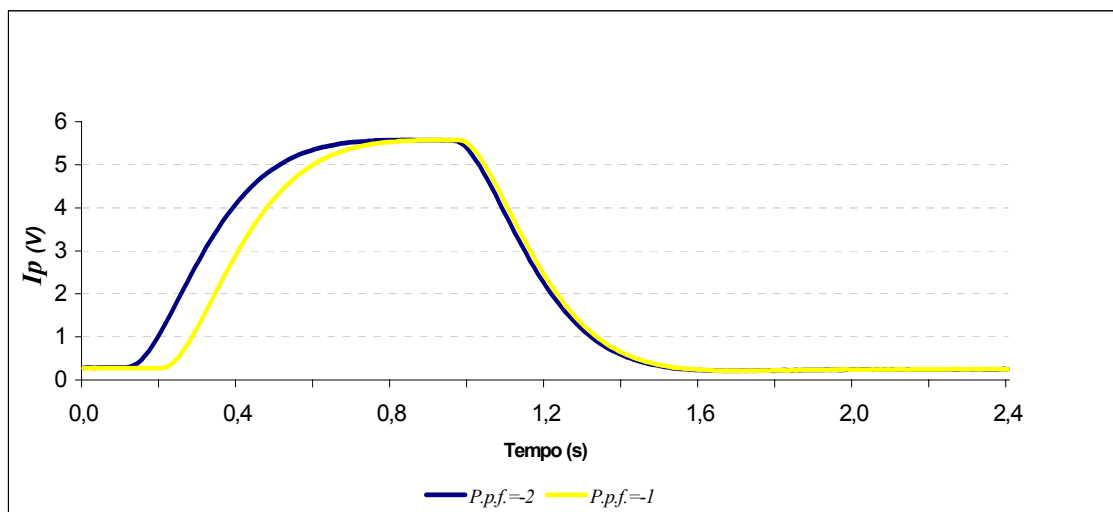


Fig. 49 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: aço não ligado

Espessura: 1mm

Gás: Ar

O nível de irradiância medido no intervalo de parâmetros operatórios testados foi tão elevado que, interferiu com o sensor capacitivo, provocando a subida contínua da cabeça e conduzindo à interrupção do corte (Fig. 50).

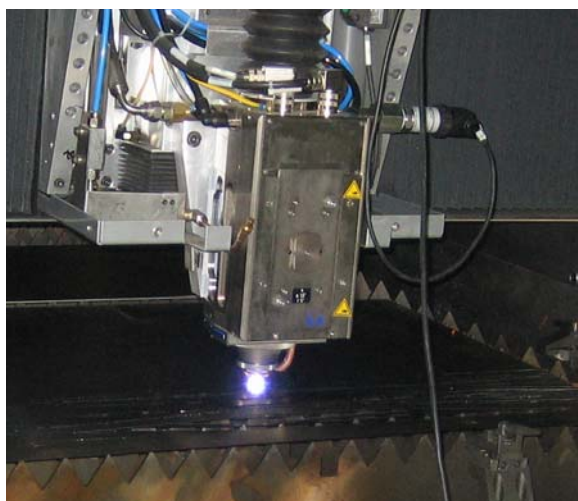


Fig. 50 – Corte de alta velocidade de aço não ligado com Ar

Na Fig. 51, mostra-se o comportamento do sensor capacitivo durante o corte efectuado com árgon. O sinal analógico em V, representado no gráfico, é directamente convertível numa distância em mm, pois o sinal varia linearmente com ela e o sensor é calibrado de forma a que 10 mm de distância entre o bico e a peça correspondam a 10V.

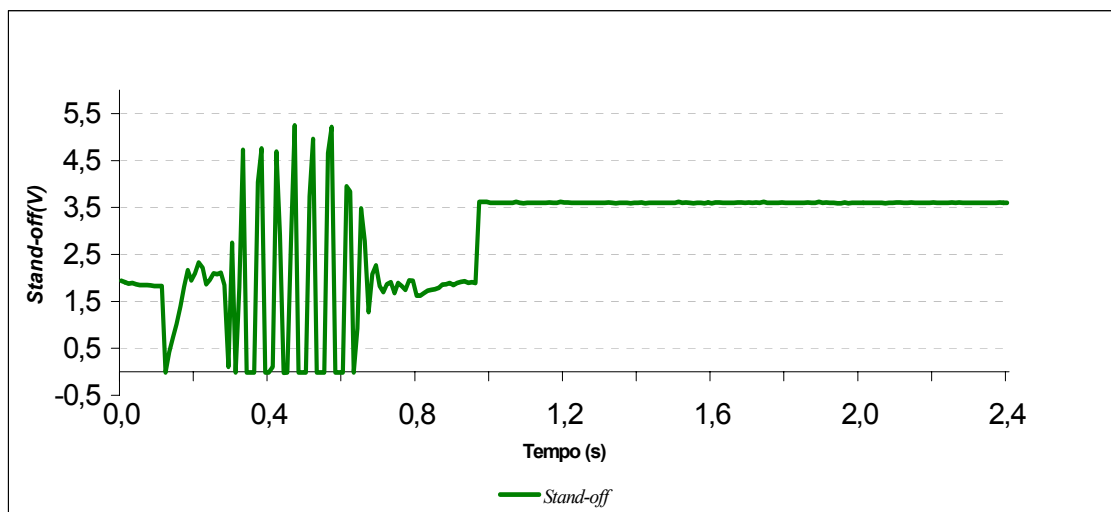


Fig. 51 - Evolução do “stand-off” com o tempo

Material: aço não ligado; Espessura: 1mm; Gás: Ar

A instabilidade verificada no gráfico, resulta da subida constante da cabeça verificada durante o corte. Em cada instante, a subida da cabeça faz aumentar a capacitância entre o bico de corte e a chapa correspondendo às depressões verificadas no gráfico, para logo em seguida, a capacitância diminuir de novo, correspondendo aos picos, devido ao aumento de ionização e maior condução do plasma.

Assim, este gás não foi usado nos restantes ensaios.

4.1.1.4. Espessura de 2 mm, com Azoto

A execução de testes em aço com espessura de 2mm obrigou forçosamente à alteração de parâmetros relativamente aos utilizados para o mesmo material com espessura de 1 mm. O enquadramento do problema é diferente, pois entram em jogo alguns factores que não se colocavam para a espessura de 1mm e que obrigam a essas alterações. As principais são a pressão e a velocidade de corte e os valores foram determinados com base no mapa qualitativo representado na Fig. 38. A pressão foi estabelecida em 8 bar, situada entre os limites de 6 e 10 bar e a velocidade foi estabelecida em 14 m/min, valor máximo para o qual já não é possível um corte de boa qualidade.

A

Tabela 5 mostra os parâmetros de corte usados nestes ensaios.

Gás	Tipo	N ₂
	Pressão	8 bar
	Caudal	10,83 m ³ /h
Diâmetro do bico		1,5 mm
Distância do bico à chapa		1 mm
Potência		3500 W (cw)
Velocidade		14 m/min
Aceleração		0.2 m.s ⁻³
Pr		1.1 V
Pp		2.2 V
Pv		90 %

Tabela 5 – Parâmetros de corte para aço não ligado com N₂

Além dos dois parâmetros já referidos, também os parâmetros responsáveis pela introdução da perturbação foram alterados, nomeadamente Pp e Pv . Dado que as velocidades de corte são muito menores, é de supor que uma redução de velocidade para metade levasse à extinção do plasma transportando-nos para o mecanismo de corte por fusão. É nesse sentido que o valor de Pv foi alterado para 90%. Por outro lado, com esta espessura mais elevada, é crível que se presenciem situações de perda de corte devido ao plasma [2, 45]. Assim, por medida de precaução baixou-se o valor de Pp , por forma a preservar o bom estado da lente.

Adicionalmente, também a aceleração foi reduzida como uma medida de precaução. Como o comportamento do plasma para estas condições é desconhecido, uma variação mais lenta da velocidade permite alargar o tempo de medida e verificar melhor a evolução da irradiância. Assim conseguiu-se evitar uma formação de plasma demasiado repentina e uma eventual perda do corte.

Finalmente, a gama de valores da posição do ponto focal foi mais restrita, pois tendo em conta os resultados obtidos para 1 mm e tratando-se agora de chapa mais espessa, não faria sentido testar valores positivos. Assim, este parâmetro variou entre -2 e 0mm.

Na Fig. 52 é mostrada a evolução de velocidade e na Fig. 53 a irradiância do plasma correspondente.

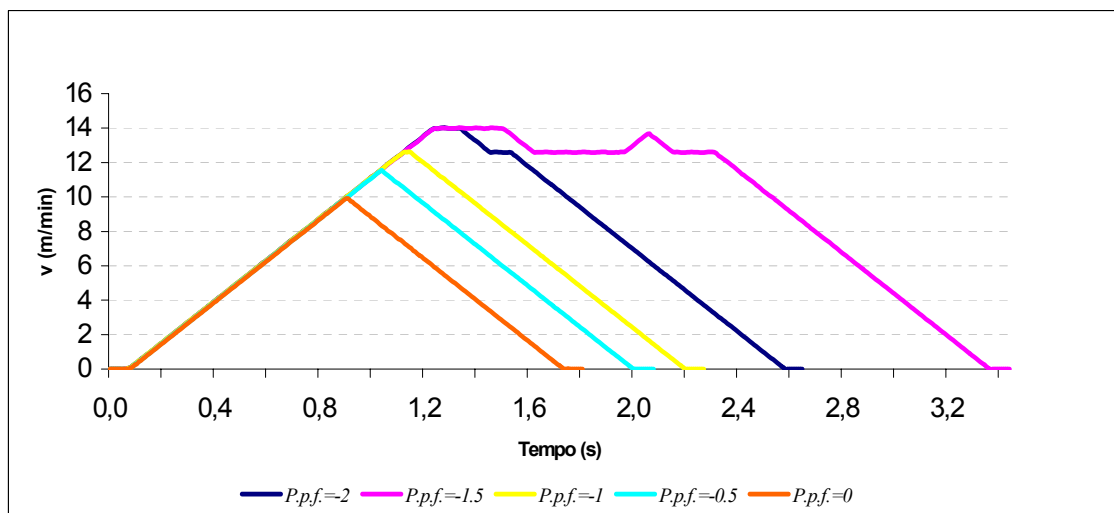


Fig. 52 – Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: aço não ligado; Espessura: 2mm; Gás: N₂

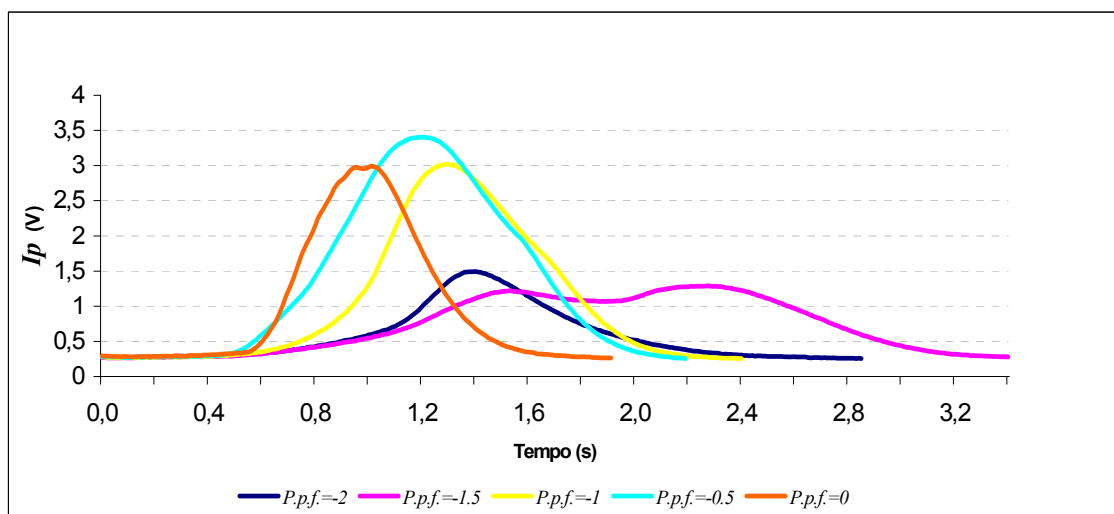


Fig. 53 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: aço não ligado; Espessura: 2mm; Gás: N₂

Das Fig. 52 e Fig. 53, conclui-se que a posição do ponto focal deve estar na metade inferior da chapa. Analisaram-se os seguintes resultados:

- Para $p.p.f. = -2,0$ – atinge-se a velocidade máxima. O sensor detecta um valor superior a 1,1V e o plasma decresce de intensidade lentamente.
- Para $p.p.f. = -1,5$ – atinge-se igualmente a velocidade máxima mas verifica-se menor irradiância (embora superior a 1,1V). Simultaneamente há uma reacção mais rápida do sistema à variação de velocidade. É a única situação em que se verifica um segundo pico de velocidade.
- Para $p.p.f. = -1, -0.5$ e 0 – o plasma cresce muito rapidamente, ultrapassando a irradiância o valor de 2,2 V, extinguindo o corte sem que seja introduzida qualquer perturbação para reduzir a velocidade de corte.

Assim, para o corte deste material, a posição do ponto focal deve ser mantida entre -2 e -1,5 mm.

4.1.1.5. Espessura de 2 mm, com Oxigénio

Neste ensaio, o gás de assistência foi alterado para oxigénio. Comparando com o ensaio anterior efectuado com N_2 , é visível na Fig. 54 uma variação muito mais rápida e uns patamares muito mais prolongados de velocidade do que os apresentados na Fig. 53.

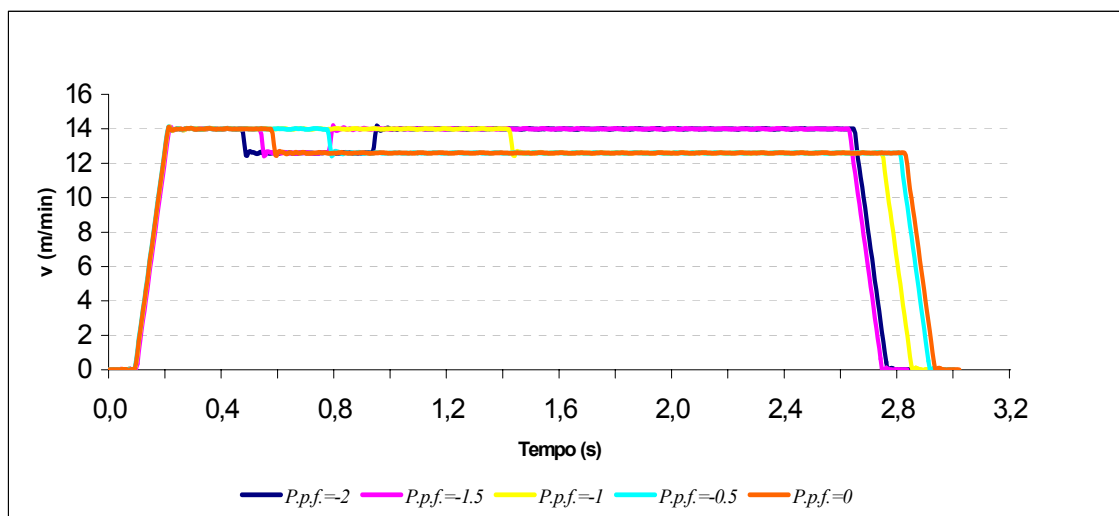


Fig. 54 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: aço não ligado; Espessura: 2mm; Gás: O_2

Naturalmente que esta maior rapidez advém de um aumento muito significativo da aceleração que passou de 0.2 para 2 m.s^{-3} . Efectivamente, a precaução tomada para o corte com N_2 verificou-se ser excessivamente conservadora conseguindo-se visualizar pequenos patamares de velocidade apenas para $p.p.f.=-2$ e $p.p.f.=-1.5$. Em todas as outras situações atingiram-se valores elevados de irradiância I_p sem estabilização de velocidade.

Tal como no ensaio anterior, dos resultados de corte com oxigénio apresentados na Fig. 55, a posição do ponto focal deve estar na metade inferior da chapa. Analisaram-se os seguintes resultados:

- Para $p.p.f. = -2,0$ e $-1,5$ – os resultados dos ensaios são muito semelhantes, embora o ponto focal mais negativo provoque uma irradiância ligeiramente superior. É interessante verificar que para ambos os casos, após a redução de velocidade provocada por Pr , a velocidade cresce novamente sem se verificar aumento de irradiância I_p . No caso de $p.p.f.=-2$, parece haver uma ligeira inflexão, perto de $t=1,1 \text{ s}$, quando se verifica de novo um aumento de velocidade.
- Para $p.p.f. = -1,0, -0,5$ e 0 – existe uma tendência para um crescimento lento de irradiância I_p independentemente da velocidade.

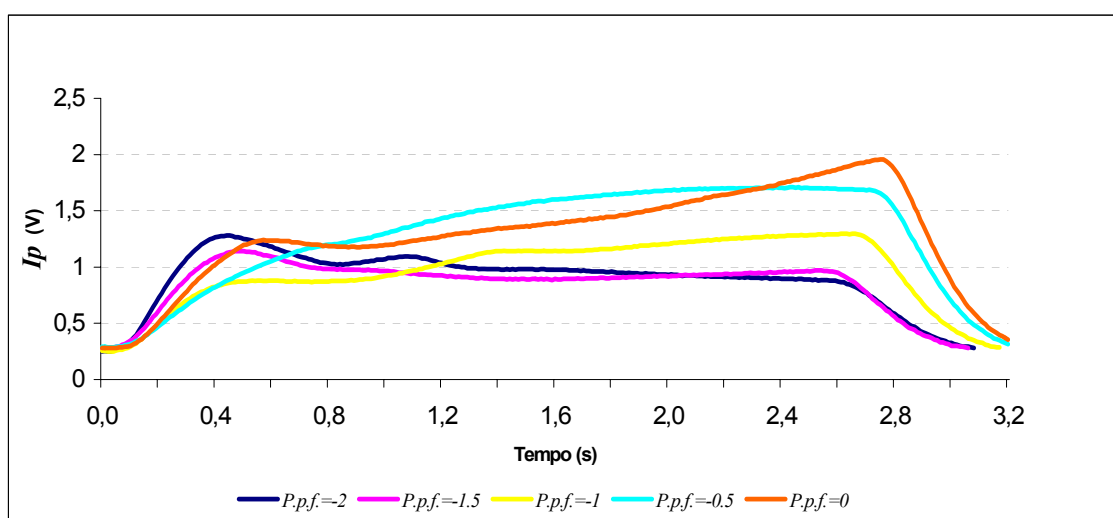


Fig. 55 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: aço não ligado; Espessura: 2mm; Gás: O_2

Tal como no ensaio anterior, a posição do ponto focal deve ser mantida entre -2 e -1,5 mm, para o corte deste material. A velocidade máxima foi atingida e as curvas de velocidades apresentam patamares extensos, indiciando que a velocidade de corte pode ser superior ao valor programado.

4.1.2 Ensaios em Alumínio AISI 5754

4.1.2.1. Espessura de 1 mm, com Azoto

Dado que o alumínio tem uma elevada reflectividade à radiação com comprimento de onda de 10,6 μm e uma elevada condutividade térmica é habitualmente difícil efectuar o corte por laser de CO_2 destes materiais. No entanto, o alumínio tem um baixo ponto de fusão e a formação de plasma na superfície da chapa ajuda à absorção da radiação laser pelo substracto [38], pelo que o alumínio é cortado com laser de CO_2 com uma velocidade superior à do aço não ligado, mantendo constante a espessura. Assim, a velocidade máxima programada foi de 50 m/min.

Na Tabela 6 são apresentados os restantes parâmetros usados neste ensaio.

Gás	Tipo	N_2
	Pressão	5 bar
	Caudal	7,2 m^3/h
Diâmetro do bico		1,5 mm
Distância do bico à chapa		1 mm
Potência		3500 W (cw)
Velocidade		50 m/min
Aceleração		1 m.s^{-3}
Pr		1.1 V
Pp		3.7 V
Pv		50 %

Tabela 6 - Parâmetros de corte de alumínio AISI 5754 com N_2

Nas Fig. 56 e Fig. 57 são apresentados os resultados destes ensaios.

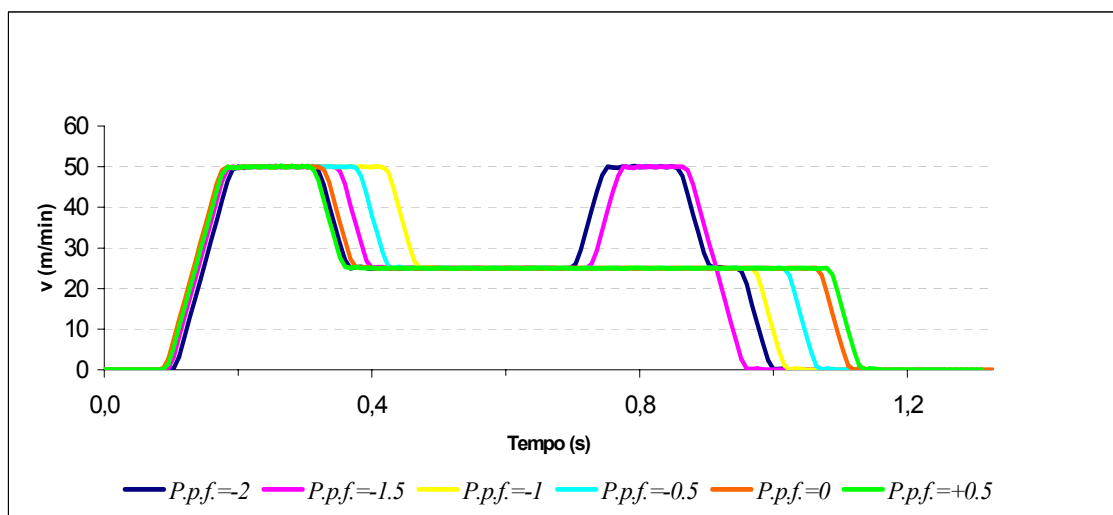


Fig. 56 – Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal
Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: N₂

Na Fig. 56 é visível a evolução da velocidade em função do tempo, com a posição do ponto focal como variável operatória. Confirma-se que é possível cortar alumínio a uma velocidade significativamente superior à do aço não ligado. Observando o extenso patamar que se verifica na velocidade de 50 m/min, para todas as posições do ponto focal ensaiadas, é previsível que se possa cortar ainda mais rápido, sugerindo assim que, na segunda fase de ensaios, pode ser programada uma velocidade superior a 50 m/min.

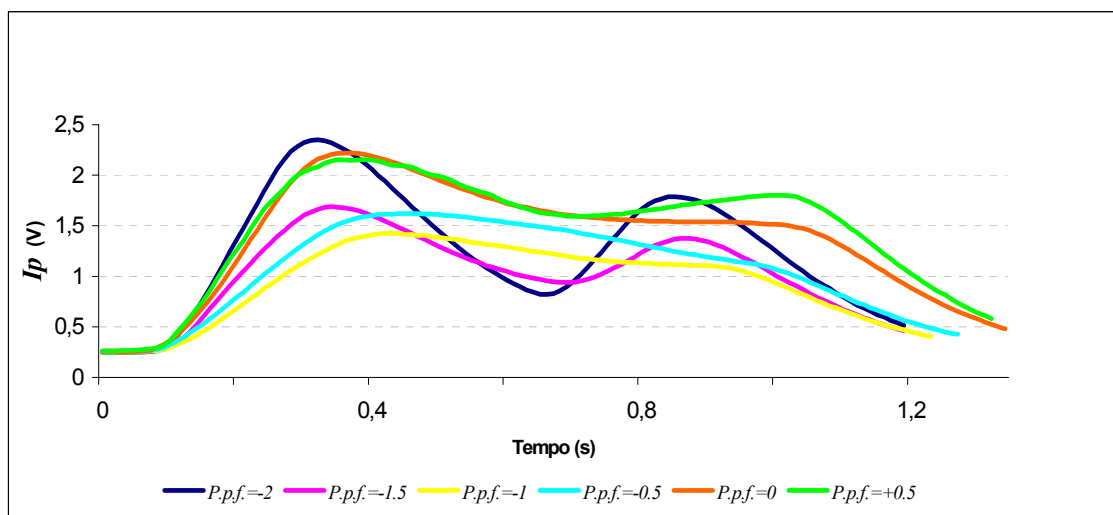


Fig. 57 - Evolução da irradiância do plasma com o tempo
Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: N₂

Na Fig. 57, verifica-se um atraso na leitura do sensor ligeiramente mais pronunciado face ao encontrado nos ensaios de aço não ligado. Destacam-se os seguintes resultados:

- Para $p.p.f. = -2$, nota-se o pico mais alto de irradiância, inferior ao máximo admissível programado (Pp). O sistema tem a resposta mais rápida, permitindo o aparecimento de um segundo pico de velocidade. Esta resposta rápida faz com que se atinja um mínimo de $I_p = 0,82$ V para $t = 0,66$ s. Esse valor mínimo de I_p é o responsável pelo segundo pico de velocidade.
- Para $p.p.f. = -1.5$, o comportamento é algo semelhante ao caso anterior, isto é, para $p.p.f. = -2$. No entanto, esta situação é mais favorável, pois são atingidos níveis inferiores de I_p , sem grande detrimento da rapidez de resposta.
- Para $p.p.f. = -1$, o sistema apresenta um comportamento amortecido, mantendo-se sem grandes variações de irradiância. Não existe um segundo pico de velocidade, devido ao comportamento amortecido da curva de irradiância. Esta tem um valor mínimo de $I_p = 1,1$ V para $t = 0,92$ s. Esta curva apresenta o comportamento menos sensível à variação de velocidade.
- Para $p.p.f. = -0,5$, 0 e $+0,5$, à semelhança do caso anterior, verifica-se também um comportamento amortecido, embora com valores de irradiância I_p superiores.

Da análise destes resultados, pode-se concluir que as posições do ponto focal acima de $-0,5$ mm não são as mais adequadas e que a velocidade de corte pode ser superior a 50 m/min.

4.1.2.2. Espessura de 1 mm, com Oxigénio

Neste conjunto de ensaios, mantiveram-se todos os parâmetros anteriores à exceção do tipo de gás de assistência.

A Fig. 58 e a Fig. 59 mostram os resultados dos ensaios.

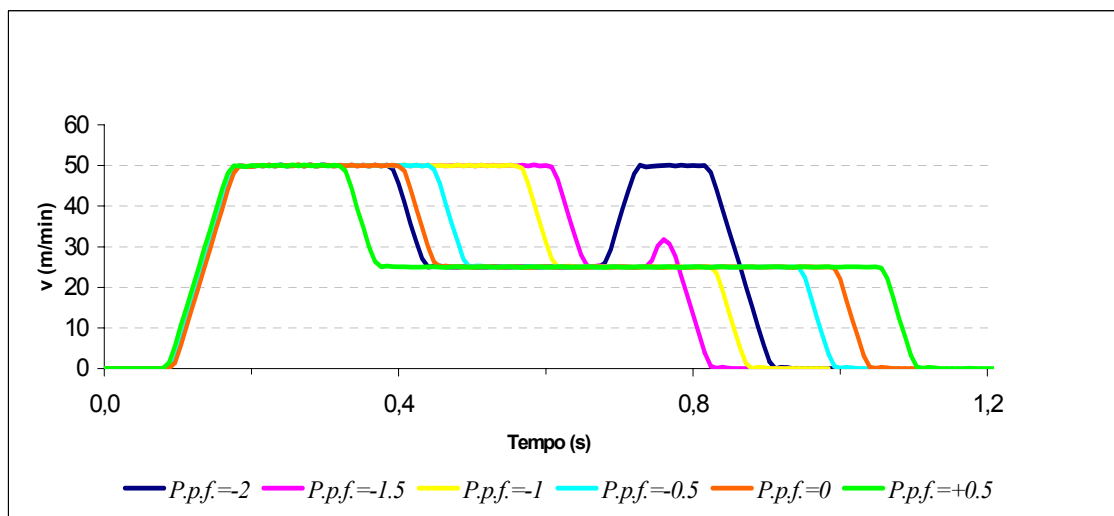


Fig. 58 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: O₂

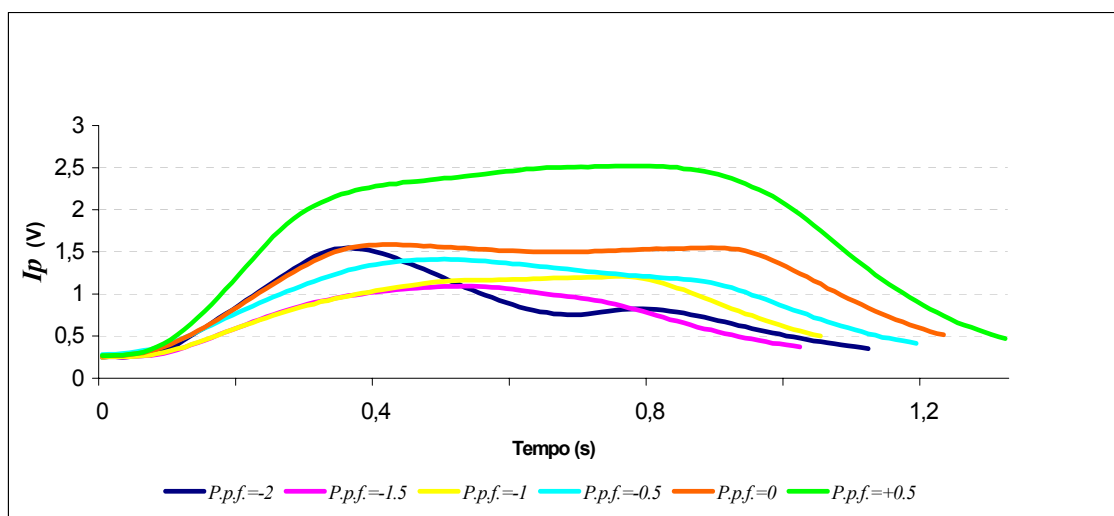


Fig. 59 – Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm ; Gás: O₂

É interessante comparar o comportamento do corte com oxigénio face ao corte com azoto. Já foi referido que não se pode fazer uma comparação precisa, mas observa-se uma tendência para uma resposta mais amortecida no corte com oxigénio. Os valores de irradiância são globalmente mais baixos. Normalmente, seria de esperar um plasma

mais intenso com oxigénio do que com azoto, pois o primeiro tem uma energia de ionização mais baixa. A explicação deste comportamento da irradiância deve estar mais uma vez associado à reacção exotérmica. A formação de uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) verifica-se no início da reacção. Essa mesma camada impede o contacto da camada fundida com o gás inibindo a continuação da reacção [27, 54]. Por este motivo, há menos material evaporado, pois o óxido de alumínio evapora a uma temperatura muito superior ao metal. Como já foi referido, a evaporação do substrato é necessária à formação do plasma, pois, para a densidade de potência em jogo, não é possível provocar a disrupção das moléculas do gás. Havendo menos alumínio evaporado, o plasma é menos intenso. Os resultados são analisados seguidamente:

- Para a $p.p.f. = -2$, o sistema é muito sensível à velocidade. É a única situação em que verifica uma reacção nítida à perturbação introduzida pela redução de velocidade. Existe um segundo pico de velocidade, atingindo também este o valor máximo de 50 m/min.
- Para $p.p.f. = -1.5$, o sistema já é bastante amortecido. É notório um extenso patamar à velocidade máxima durante o qual o aumento de irradiância é muito lento. Verifica-se um segundo pico de velocidade, já muito próximo do final do corte, impedindo o alcance de uma velocidade superior a 32 m/min.
- Para $p.p.f. = -1, -0.5, 0$ e $+0.5$, o sistema é amortecido e os valores de irradiância I_p vão sendo maiores à medida que a posição do ponto focal se desloca para a superfície da chapa.

Conclui-se que para uma posição do ponto focal superior a -1 mm, as condições não são óptimas para o corte de alta velocidade e, à semelhança do ensaio anterior, os extensos patamares de velocidade indiciam que o corte se pode efectuar com uma velocidade superior a 50 m/min.

4.1.2.3. Espessura de 2 mm, com Azoto

O aumento de espessura levou a variar a posição do ponto focal entre -2 e -1 mm, de modo a garantir o corte por plasma deste material. Na Tabela 7, são apresentados os parâmetros de corte usados neste ensaio.

Gás	Tipo	N ₂
	Pressão	8 bar
	Caudal	10,83 m ³ /h
Diâmetro do bico		1,5 mm
Distância do bico à chapa		1 mm
Potência		3500 W (cw)
Velocidade		20 m/min
Aceleração		2 m.s ⁻³
Pr		1.1 V
Pp		2.2 V
Pv		90 %

Tabela 7 - Parâmetros de corte de alumínio AISI 5754 com N₂

As Fig. 60 e Fig. 61 mostram os resultados dos ensaios.

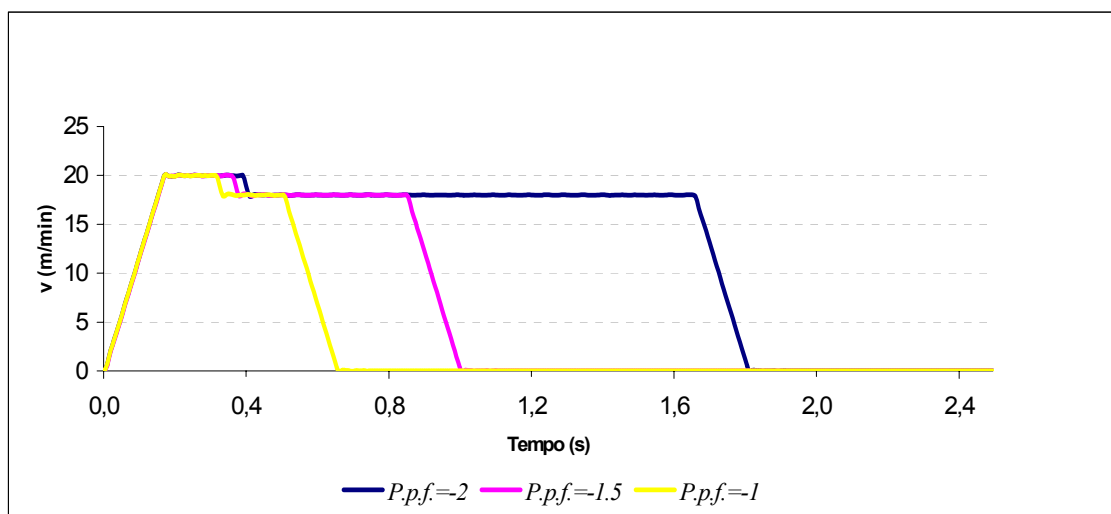


Fig. 60 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: N₂

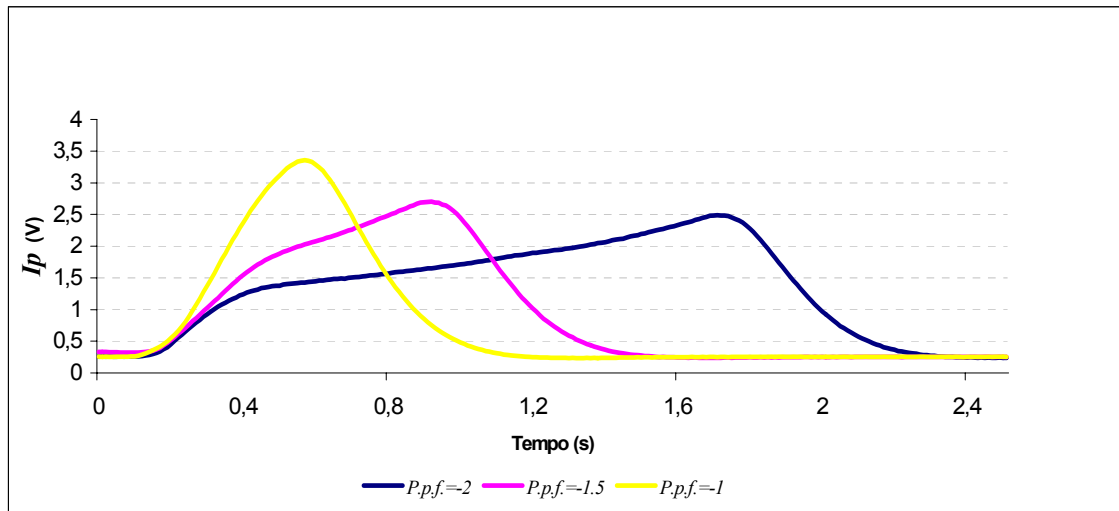


Fig. 61 – Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: N₂

Das figuras, pode-se verificar o seguinte:

- Para $p.p.f. = -2$, o valor de irradiância cresce gradualmente até que para $t=1,7s$, o corte se extingue. Neste caso, a formação de plasma é pouco sensível à velocidade.
- Para $p.p.f. = -1,5$ e -1 , o valor de irradiância cresce mais rapidamente traduzindo uma maior dependência da velocidade. A redução de velocidade não é suficiente para impedir o aumento contínuo da irradiância até à extinção do corte.

Da análise destes resultados, conclui-se que um ponto focal situado em -1 mm corresponde à situação de corte menos adequada e que a velocidade de 20 m/min, embora alcançada em todos os ensaios, pode ser excessiva.

4.1.2.4. Espessura de 2 mm, com Oxigénio

Tendo em conta os resultados obtidos para a chapa de 1mm, aumentou-se a velocidade para 25 m/min. Na Tabela 8 são mostrados os parâmetros usados neste ensaio.

Gás	Tipo	O ₂
	Pressão	8 bar
	Caudal	10,83 m ³ /h
Diâmetro do bico		1,5 mm
Distância do bico à chapa		1 mm
Potência		3500 W (cw)
Velocidade		25 m/min
Aceleração		2 m.s ⁻³
Pr		1.1 V
Pp		2.2 V
Pv		90 %

Tabela 8 - Parâmetros de corte de alumínio AISI 5754 com O₂

Nas Fig. 62 e Fig. 63 mostram-se os resultados deste ensaio.

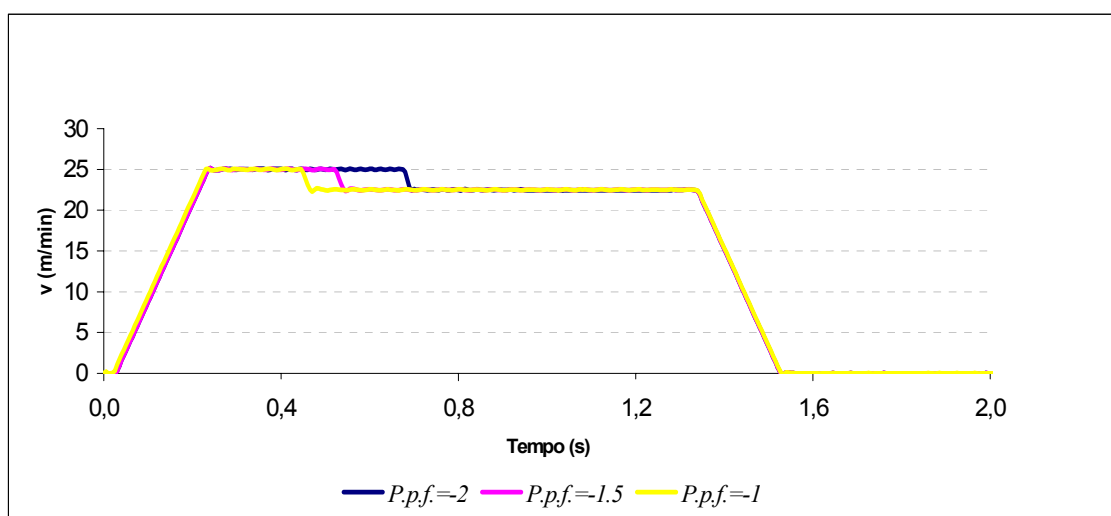


Fig. 62 - Evolução da velocidade de corte com o tempo para várias posições do ponto focal testadas

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: O₂

A tendência dos resultados é muito idêntica à dos ensaios com azoto. Mais uma vez, nos ensaios com o oxigénio a irradiância é baixa o que introduziu amortecimento na resposta do sistema.

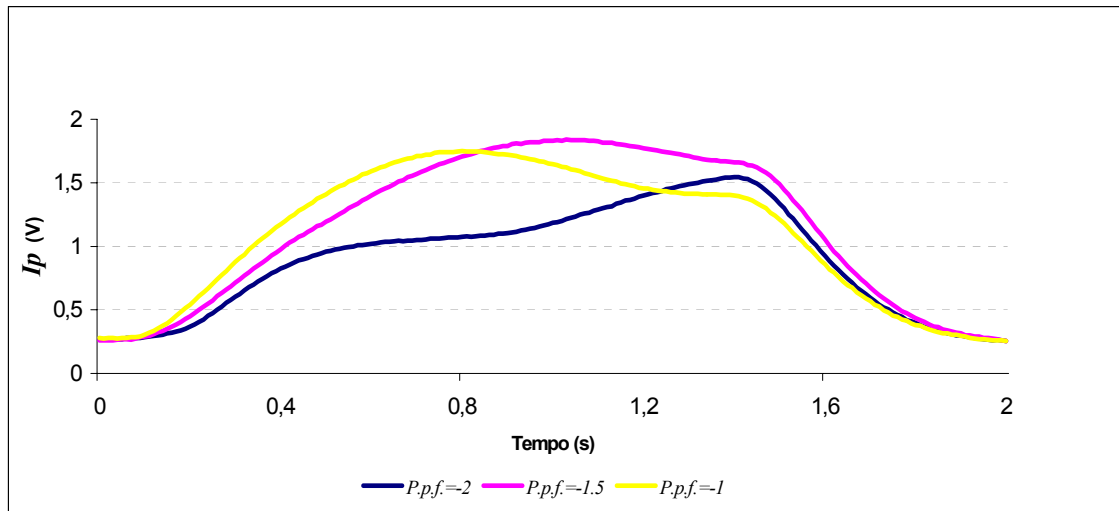


Fig. 63 – Evolução da irradiância do plasma com o tempo

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: O_2

Verifica-se ainda que:

- Para $p.p.f. = -2$, o valor de irradiância cresce gradualmente sem nunca exceder o valor programado para P_p . No entanto, o facto de o declive ser claramente positivo antes da inflexão, leva a crer que se o corte fosse mais prolongado, o valor de P_p seria alcançado e o corte se extinguiria.
- Para $p.p.f. = -1,5$ e -1 , o valor de irradiância cresce mais rapidamente no início para depois estabilizar. A estabilização dá-se significativamente depois da introdução da perturbação, denotando que o sistema é bastante insensível à redução de velocidade.

4.1.3 Conclusões sobre os resultados da primeira fase de ensaios

Dos resultados apresentados é possível concluir o seguinte:

1. Embora não se possam comparar, de forma exacta, valores quantitativos de irradiância de plasma para gases ou substratos diferentes, qualitativamente pode-se dizer que:

- a. O plasma formado no corte com azoto é menos irradiante do que o formado no corte com árgon e mais irradiante do que o formado com oxigénio. Comparando a energia de ionização dos três gases usados, a energia de ionização do oxigénio é a mais baixa. Como tal, seria de esperar um plasma mais irradiante com este gás. Tal não acontece, devido à formação de óxidos na superfície de corte o que reduz a evaporação da superfície de corte;
 - b. O plasma formado no corte de aço não ligado é mais irradiante do que no corte de alumínio. Esta conclusão tem de ser analisada com precaução, posto que se trata de materiais diferentes, e como tal os plasmas formados têm características diferentes. Só uma análise espectrométrica permitiria uma comparação quantitativa. Por outro lado, o alumínio tem um ponto de fusão muito mais baixo do que o aço não ligado, logo o material é fundido e expulso muito mais rapidamente, havendo por isso menos tempo para evaporação do substrato e, como tal, menor irradiância.
2. O corte com oxigénio permite a obtenção de velocidades de corte superiores às obtidas no corte com azoto ou árgon, o que é facilmente explicado pela existência de reacções exotérmicas responsáveis por um acréscimo significativo de energia, no caso dos aços e do alumínio.
3. O corte de espessura de 1 mm é possível para uma gama grande de posições de ponto focal, embora com variação de qualidade de acabamento da superfície de corte. Pelo contrário, no corte da espessura de 2mm usando azoto, a gama de posições de ponto focal onde é possível cortar é muito mais restrita. O oxigénio tende a igualar os comportamentos das curvas de irradiância, não existindo comportamentos tão variáveis quanto os que se observam para o azoto.
4. A sensibilidade do plasma à variação de velocidade é diferente conforme o gás usado e a posição do ponto focal:
 - a. Com azoto e o ponto focal situado na metade inferior da chapa, o plasma é muito sensível à variação de velocidade. Posições de ponto focal superiores tendem a diminuir os picos de irradiância, sendo as curvas de irradiância muito mais planas;

- b. O plasma formado no corte com oxigénio, comparado com o formado no corte com azoto, é menos sensível à variação de velocidade;
 - c. Com árgon, o plasma cresce muito rapidamente e afecta o sensor capacitivo, interrompendo o corte. Este fenómeno está relacionado com a ionização do árgon que torna o plasma suficientemente condutor impedindo que o sensor capacitivo mantenha correctamente a distância do bico à chapa.
5. A posição do ponto focal afecta a formação de plasma de formas distintas, conforme o substracto, o gás ou a espessura:
- a. No corte de aço não ligado e de alumínio, com azoto e na espessura de 1mm, pontos focais negativos aumentam a sensibilidade à velocidade, enquanto que para pontos focais superiores a 0 mm a irradiância tende a crescer mais lentamente, apresentando um comportamento mais amortecido. Este comportamento é normal, pois sabe-se que o plasma se forma na vizinhança do ponto focal, onde a densidade de energia é maior [2]. Assim, um ponto focal muito abaixo da face inferior da chapa, diminui a quantidade de energia transferida para o plasma. Assim, necessariamente, este terá também uma energia inferior e uma menor pressão de expulsão, o que se reflecte numa menor eficácia na expulsão da camada fundida. Um aumento da velocidade leva à interrupção do processo de corte. O colapso traduz-se num aumento repentino de irradiância, pois o material “não expulso” impede o escoamento, elevando a pressão e alimentando por sua vez o plasma. Para posições do ponto focal superiores, da ordem de metade da espessura, a cedência de energia à peça é máxima, aproveitando o facto de o ponto de máxima densidade de potência se encontrar no seio do substracto. Assim, o plasma é mais eficaz na expulsão de matéria, diminuindo a sua dependência com a velocidade. Pontos focais ainda mais positivos tendem a aumentar a irradiância de forma lenta e gradual, mesmo com uma velocidade de corte constante. Isto pode indicar que o corte é menos eficaz e que o plasma se vai expandido gradualmente devido a uma evaporação

do substrato mais pronunciada. No caso da espessura de 2mm, os pontos focais mais negativos ensaiados correspondem a pontos focais no meio ou na parte inferior da espessura. São os que apresentam menor irradiância à semelhança do que aconteceu para chapa com espessura de 1mm. Pontos focais positivos provocam plasma com grande irradiância devido à extinção quase imediata do processo de corte;

- b. No corte com oxigénio, de aço não ligado ou de alumínio, independentemente da espessura, pontos focais negativos tendem a amortecer a reacção do plasma à variação de velocidade. Pontos focais positivos tendem a elevar a irradiância lentamente, mesmo para uma velocidade de corte constante. No caso do oxigénio, este comportamento deve-se à reacção exotérmica.

4.2. *Segunda fase de ensaios - Optimização do corte*

Da análise dos resultados da primeira fase de ensaios foi possível seleccionar os valores mais adequados para a velocidade e a posição do ponto focal para prosseguir com a segunda fase. A escolha dos valores de cada uma destas variáveis a usar na segunda fase de ensaios foi feita segundo os seguintes critérios:

- Cada um dos valores de velocidade e posição do ponto focal seleccionados para a segunda fase de ensaios, corresponde a uma curva de velocidade e/ou irradiância, resultante da primeira fase de ensaios, cujo comportamento se notabiliza comparando todas as curvas dos ensaios, indiciando possíveis condições para a obtenção da velocidade máxima ou para obtenção de níveis mínimos de plasma;
- Os valores de velocidade e posição do ponto focal seleccionados têm de ser os mesmos para cada combinação material-espessura-tipo de gás de assistência.

Cada valor seleccionado obedece aos dois critérios. Estes levaram à selecção de quatro velocidades e três posições do ponto focal, para a segunda fase de ensaios em

chapa de 1mm. Para a chapa de 2mm, foram seleccionadas quatro velocidades e duas posições do ponto focal.

Em relação aos valores seleccionados para a posição do ponto focal, consideraram-se os seguintes, para chapa de 1mm de aço não ligado:

$p.p.f. = -1,5$ – por apresentar a resposta do sistema mais sensível a perturbações, em corte com N_2 , e por apresentar uma baixa irradiância, com uma curva sem grandes variações, em corte com O_2 ;

$p.p.f. = -1$ – por proporcionar uma das velocidades mais elevadas, associada à irradiância mais baixa, em corte com N_2 , e por apresentar a resposta do sistema mais sensível a perturbações como se pode ver pelo segundo pico de velocidade, no corte com O_2 ;

$p.p.f. = 0$ – pelo facto de a irradiância ter o comportamento mais estável no corte com N_2 e por apresentar uma velocidade próxima do valor máximo verificado no ensaio de corte com O_2 , com um comportamento constante de irradiância;

Para chapa de 2mm, consideraram-se as posições do ponto focal de -2 e -1,5 mm, pelo facto de serem as únicas posições para as quais o corte com N_2 não se extinguiu e o corte com O_2 apresentou menor irradiância;

Em relação à velocidade, para corte de aço não ligado com azoto ou com oxigénio, em espessura de 1mm, foram seleccionados os seguintes valores:

- 35 m/min – correspondente ao valor máximo alcançado;
- 20 m/min – por ser o valor para o qual a irradiância foi mínima.

Para além destes, consideraram-se ainda dois valores intermédios de 25 e 30 m/min.

Para o corte de aço não ligado, com espessura de 2 mm, os valores seleccionados de velocidade foram os seguintes:

- $v = 14$ m/min – por ter sido a velocidade mais alta alcançada;
- $v = 16$ m/min – o facto da curva de velocidade apresentar um patamar estável para $v = 14$ m/min, faz prever que possa ser atingida uma velocidade superior, assim foi seleccionado o valor de 16 m/min;
- $v = 10$ m/min, $v = 12$ m/min - por serem valores imediatamente inferiores à velocidade máxima alcançada de 14 m/min;

No caso dos valores seleccionados para a posição do ponto focal no corte de alumínio, estes foram idênticos aos seleccionados para o aço não ligado com excepção da $p.p.f. = 0$, a qual foi substituído por $p.p.f. = -2$. Esta alteração deve-se às diferenças de

comportamento existentes entre os dois materiais. A escolha destes valores foi feita seguindo o raciocínio que levou à selecção dos parâmetros para aço não ligado. Em relação à velocidade, também houve a necessidade de proceder a algumas alterações. No caso da chapa de 1mm com N₂, as velocidades foram 30, 40, 50 e 60 m/min. Com O₂, a velocidade máxima foi estendida até 80 m/min. A chapa com 2 mm de espessura foi ensaiada a velocidades de 16, 18, 20 e 22 m/min com N₂, e 20, 23, 25 e 30 m/min com O₂.

Na segunda fase de ensaios, conforme descrito em 3.3.3, um terceiro material foi ensaiado: o aço inoxidável AISI 304. Para este material, foram usados os mesmos parâmetros que para o aço não ligado.

Na Tabela 9 estão resumidos os parâmetros a usar na segunda fase.

		Aço DC03		Aço inox. AISI 304		Alumínio AISI 5754	
		V (N ₂)	v (O ₂)	v (N ₂)	v (O ₂)	v (N ₂)	v (O ₂)
Espessura 1 mm,	p.p.f.=2mm	-	-	-	-	30m/min	30m/min
		-	-	-	-	40m/min	40m/min
		-	-	-	-	50m/min	50m/min
		-	-	-	-	60m/min	80m/min
	p.p.f.=1,5mm	20m/min	20m/min	20m/min	20m/min	30m/min	30m/min
		25m/min	25m/min	25m/min	25m/min	40m/min	40m/min
		30m/min	30m/min	30m/min	30m/min	50m/min	50m/min
		35m/min	35m/min	35m/min	35m/min	60m/min	80m/min
	p.p.f.=1 mm	20m/min	20m/min	20m/min	20m/min	30m/min	30m/min
		25m/min	25m/min	25m/min	25m/min	40m/min	40m/min
		30m/min	30m/min	30m/min	30m/min	50m/min	50m/min
		35m/min	35m/min	35m/min	35m/min	60m/min	80m/min
	p.p.f.=0 mm	20m/min	20m/min	20m/min	20m/min	-	-
		25m/min	25m/min	25m/min	25m/min	-	-
		30m/min	30m/min	30m/min	30m/min	-	-
		35m/min	35m/min	35m/min	35m/min	-	-
Espessura de 2mm	p.p.f.=2mm	10m/min	10m/min	10m/min	10m/min	16m/min	20m/min
		12m/min	12m/min	12m/min	12m/min	18m/min	23m/min
		14m/min	14m/min	14m/min	14m/min	20m/min	25m/min
		16m/min	16m/min	16m/min	16m/min	22m/min	30m/min
	p.p.f.=1,5mm	10m/min	10m/min	10m/min	10m/min	16m/min	20m/min
		12m/min	12m/min	12m/min	12m/min	18m/min	23m/min
		14m/min	14m/min	14m/min	14m/min	20m/min	25m/min
		16m/min	16m/min	16m/min	16m/min	22m/min	30m/min

Tabela 9 - Parâmetros seleccionados para a segunda fase de ensaios

Na segunda fase de ensaios, pretenderam-se determinar as condições para um corte de alta velocidade com boa qualidade, em ambiente industrial. Para isso foi feita uma observação visual e em microscopia óptica com baixa ampliação para observar o aspecto da superfície e a existência ou não de rebarba de modo a qualificar a superfície de corte.

É importante ressaltar que à medida que os provetes foram sendo cortados, foram libertadas tensões internas, induzindo distorções na chapa. Essas distorções influenciaram o corte, alterando a distância do bico à chapa, pelo motivo de que o eixo Z não foi suficientemente rápido para reagir às ondulações da chapa. Esse facto é visível através de flutuações do “*stand-off*”. Verificou-se que essas flutuações limitaram a velocidade máxima de corte, fazendo então esta situação, parte das condições industriais nas quais foi proposta a execução deste trabalho.

4.2.1 Ensaios em aço não ligado DC03 (EN10130)

4.2.1.1. Espessura de 1mm, com azoto

A Tabela 10 apresenta os parâmetros de corte usados nestes ensaios.

Parâmetros		Provete 1	Provete 2	Provete 3
Gás	Tipo	N ₂	N ₂	N ₂
	Pressão	5 bar	5 bar	5 bar
	Caudal	7,2 m ³ /h	7,2 m ³ /h	7,2 m ³ /h
“Stand-off”		1 mm	1 mm	1 mm
Potência		3500W(cw)	3500W(cw)	3500W(cw)
Velocidade		20, 25, 30, 35 m/min	20, 25, 30, 35 m/min	20, 25, 30, 35 m/min
Aceleração		20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³
<i>p.p.f.</i>		-1,5 mm	-1,0 mm	-0,5 mm

Tabela 10 – Parâmetros de corte de provetes de aço não ligado, com N₂

A Tabela 11 resume a apreciação visual das superfícies de corte. Considerou-se uma boa superfície de corte aquela que não revelava rebarba ou estrias a olho nu.

$\begin{matrix} v \\ p.p.f. \end{matrix}$	20m/min	25m/min	30m/min	35m/min
-1,5mm	Boa	Boa	Má	Não cortou
-1mm	Má	Boa	Não cortou	Não cortou
0mm	Boa	Não cortou	Não cortou	Não cortou

Tabela 11 - Qualidade do corte de provetes de aço não ligado DC03, com N₂

Da Tabela 11, conclui-se que é possível cortar com boa qualidade para uma velocidade de 25 m/min e um ponto focal situado em -1mm ou -1,5mm. Uma posição do ponto focal em -1,5 mm é mais tolerante, pois permite a obtenção de resultados aceitáveis numa gama mais larga de velocidades. A Fig. 64 mostra as curvas de irradiância do plasma formado nos cortes deste ensaio e confirma esta análise, pois é para um ponto focal situado em -1,5mm, que a irradiância tem valores mais baixos. Pode-se concluir ainda que para a obtenção de um corte aceitável, o valor de irradiância lido pelo sensor óptico não deve ser superior a 2V. Este resultado está concordante com os resultados da primeira fase de ensaios.

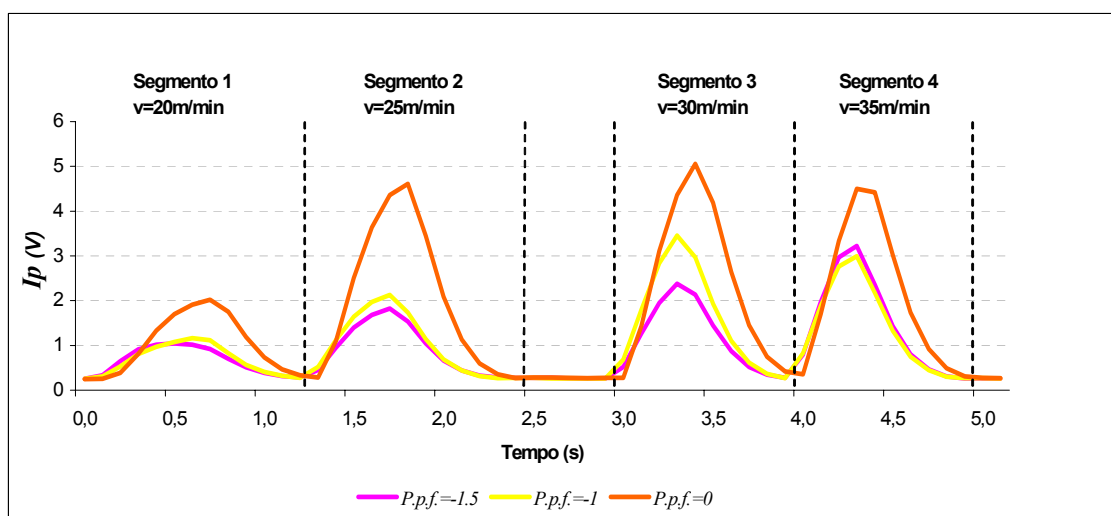


Fig. 64 – Evolução da irradiância no corte de provetes de aço não ligado

Material: aço não ligado DC03; Espessura: 1mm; Gás: N₂

4.2.1.2. Espessura de 1mm, com oxigénio

Nestes ensaios foram usados os mesmos parâmetros do ensaio anterior, exceptuando o gás de assistência que neste caso foi o oxigénio.

Uma das primeiras evidências que foi notada quando se observou o corte de aço não ligado com oxigénio foi a enorme distorção que a chapa sofreu devido à carga térmica em jogo. A distorção da chapa, em particular sendo chapa fina, pode influenciar de forma crítica o processo de corte. As distorções não só obrigam a movimentos do eixo Z para seguir a ondulação da chapa, como também provocam situações de apoio precário da chapa na mesa da máquina, levando a que esta vibre por acção do gás.

A Tabela 12 resume uma apreciação visual das superfícies de corte.

$\begin{matrix} v \\ p.p.f \end{matrix}$	20m/min	25m/min	30m/min	35m/min
-1,5mm	Boa	Boa	Boa	Não cortou
-1mm	Boa	Boa	Boa	Não cortou
0mm	Boa	Rebarba	Não cortou	Não cortou

Tabela 12 – Resultados de corte de provetes de aço não ligado DC03, com O₂

Da Tabela 12, verifica-se que o corte com boa qualidade foi possível para uma velocidade de 30m/min e um ponto focal situado em -1mm ou -1,5mm. Na Fig. 65 (segmento 3), verifica-se que o valor de irradiância lido no sensor óptico para estes casos, é respectivamente 3V e 1,5 V respectivamente. O valor de irradiância para uma posição do ponto focal de -1mm, no segmento 4, é de 2,5 V. Neste ponto verifica-se uma situação aparentemente contraditória. Seria de esperar que a irradiância medida para a situação de processamento a 35 m/min, com $p.p.f. = -1\text{mm}$ ou $p.p.f. = -1,5\text{mm}$, em que não foi possível efectuar o corte, fosse superior à irradiância medida na situação em que o corte foi efectuado, com qualidade, para 30m/min e $p.p.f. = -1\text{mm}$.

Analisando os resultados obtidos na primeira fase (Fig. 48), verifica-se que a curva de irradiância do plasma, para uma posição do ponto focal em 0 mm, apresenta um comportamento bastante plano, traduzindo assim, uma certa independência da velocidade. A Fig. 65 mostra isso mesmo, pois o nível de irradiância não é significativamente alterado para uma velocidade de corte igual ou superior a 25 m/min. Contrariamente, a curva de irradiância para a posição do ponto focal em -1mm, apresenta uma grande dependência da velocidade. Este facto contraria o resultado obtido na Fig. 65. A evolução do segundo para o quarto segmento apresenta um crescimento normal de irradiância, correspondendo ao comportamento esperado. O valor inesperado de irradiância verificado para o terceiro segmento pode ser atribuído à deformação da chapa. A Fig. 66 confirma a existência dessa deformação, pois ao longo

do corte dos vários segmentos, observa-se um paralelismo constante entre as duas curvas, excepto na zona correspondente ao terceiro segmento. O acréscimo de energia proveniente da reacção exotérmica pode ter contribuído para que, mesmo com um aumento significativo da irradiância, o corte tenha sido efectuado com sucesso.

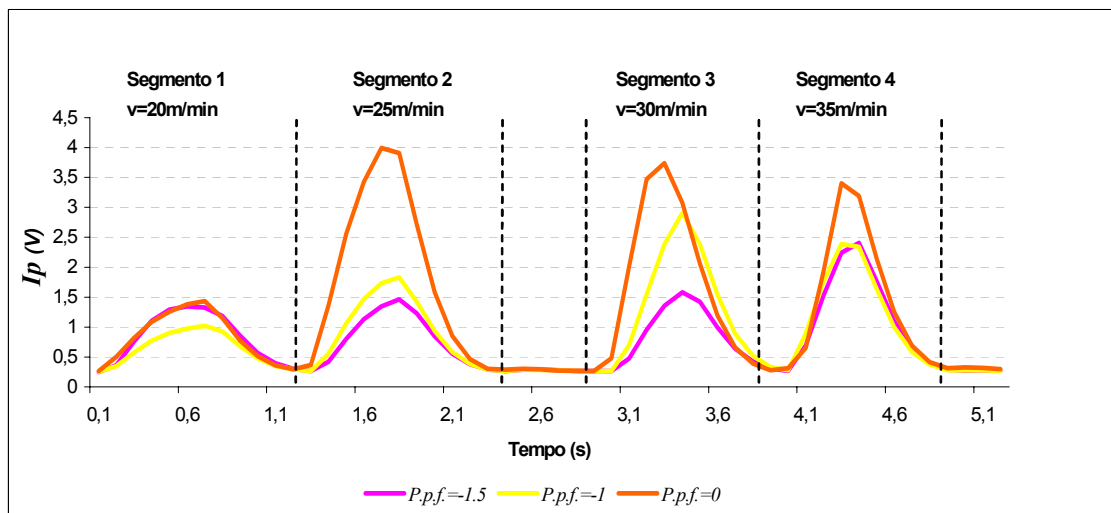


Fig. 65 – Evolução da irradiância no corte de provetes de aço não ligado

Material: aço não ligado DC03; Espessura: 1mm; Gás: O₂

Desta análise pode-se concluir que a velocidade máxima atingível é de 30 m/min, para um ponto focal de -1,5mm ou -1mm, e para uma irradiância máxima de 3V.

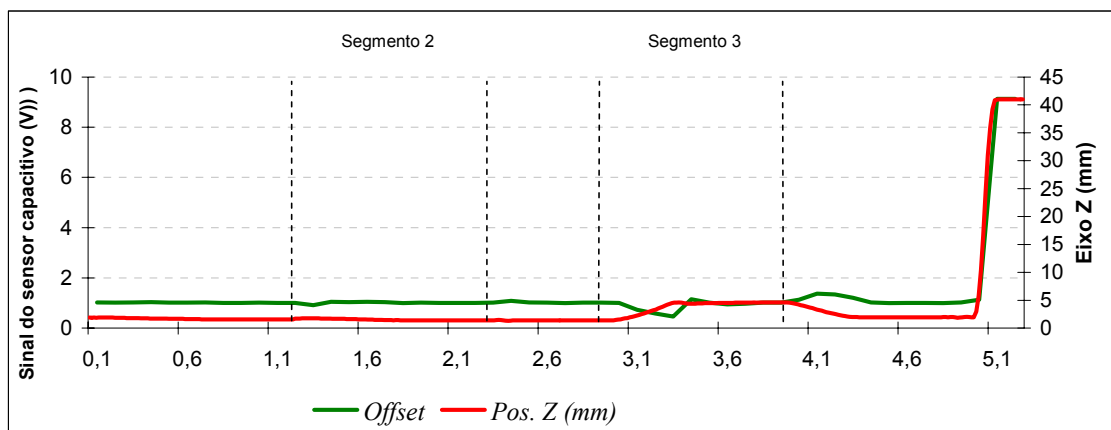


Fig. 66 – Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”

Material: aço não ligado DC03; Espessura: 1mm; Gás: O₂

P.p.f. = -1 mm

4.2.1.3. Espessura de 2mm, com azoto

A Tabela 13 apresenta os parâmetros de corte usados neste ensaio.

Parâmetros		Provete 1	Provete 2
Gás	Tipo	N ₂	N ₂
	Pressão	8 bar	8 bar
	Caudal	10,83 m ³ /h	10,83 m ³ /h
“Stand-off”		1 mm	1 mm
Potência		3500W(cw)	3500W(cw)
Velocidade		10, 12, 14, 16 m/min	10, 12, 14, 16 m/min
Aceleração		20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³
<i>p.p.f.</i>		-2 mm	-1,5 mm

Tabela 13 – Parâmetros de corte de provetes de aço não ligado, com N₂

A Tabela 14 resume a apreciação visual da qualidade da superfície de corte.

<i>p.p.f.</i> \ v	10m/min	12m/min	14m/min	16m/min
-2mm	Boa	Pequena rebarba	Não cortou	Não cortou
-1,5mm	Boa	Má	Não cortou	Não cortou

Tabela 14 – Resultados do corte de provetes de aço não ligado DC03, com N₂

Da Tabela 14, pode-se concluir que a velocidade de corte não deve ser superior a 10 m/min, para um ponto focal, colocado em -2 ou -1,5mm. A curva de irradiância, apresentada na Fig. 67, ilustra o comportamento esperado, concordante com os resultados da primeira fase de ensaios, pelo que não justifica uma análise detalhada. À semelhança do que se observou na primeira fase de ensaios, os valores de irradiância são ligeiramente mais baixos para uma posição do ponto focal situado em -1,5 mm. Pode-se dizer que o corte com boa qualidade se verifica para as seguintes condições:

- a velocidade de corte não deve ser superior a 10 m/min;
- o ponto focal deve ser situado, preferencialmente, em -1,5mm;
- a irradiância deve ser menor do que 0,8 V.

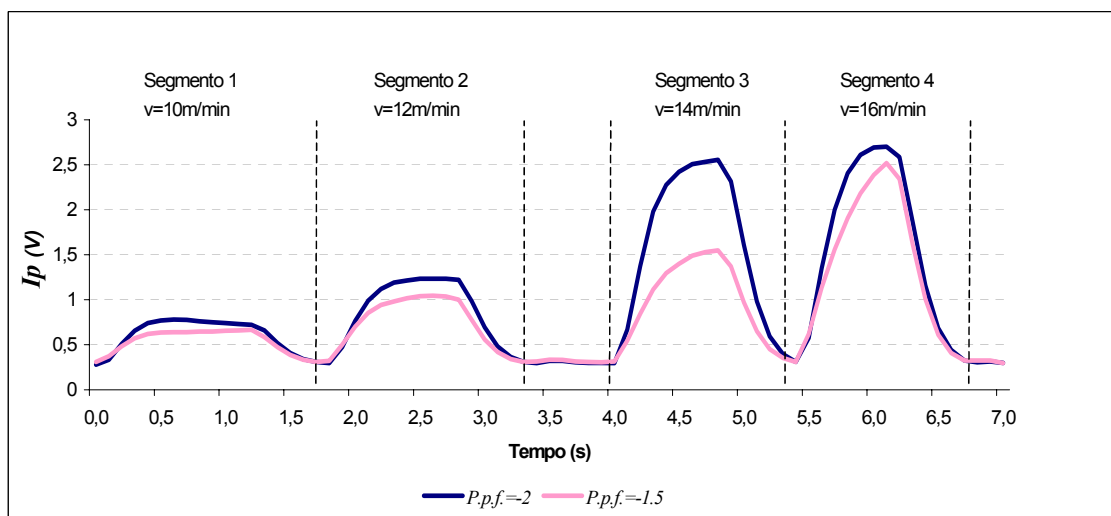


Fig. 67 – Evolução da irradiância do plasma no corte de provetes de aço não ligado

Material: aço não ligado DC03; Espessura: 2mm; Gás: N₂

4.2.1.4. Espessura de 2mm, com oxigênio

Nestes ensaios foram usados os mesmos parâmetros do ensaio anterior, tendo-se alterado apenas o gás de assistência, o qual foi alterado para oxigênio. Da Tabela 15, verifica-se que se obtêm os melhores resultados de corte para uma posição do ponto focal situado em -2mm. Embora a qualidade de corte, para este caso, seja considerada boa, é importante ressaltar que todos os provetes resultantes destes cortes apresentaram estrias e adesão de óxidos na aresta inferior. A distinção foi feita empiricamente de acordo com a profundidade das estrias e a dificuldade em remover a camada de óxido aderente na aresta inferior.

$\begin{matrix} v \\ p.p.f. \end{matrix}$	10m/min	12m/min	14m/min	16m/min
-2mm	Bom	Bom	Bom	Pequena rebarba
-1,5mm	Má superfície e rebarba	Má superfície e rebarba	Pequena rebarba	Pequena rebarba

Tabela 15 – Resultados de corte de provetes de aço não ligado DC03, com O₂

Confrontando estes resultados com as respectivas curvas de irradiância (Fig. 68), verifica-se que para uma posição do ponto focal situado em -2 mm, os valores de irradiância são superiores aos valores obtidos para um ponto focal situado em -1,5mm.

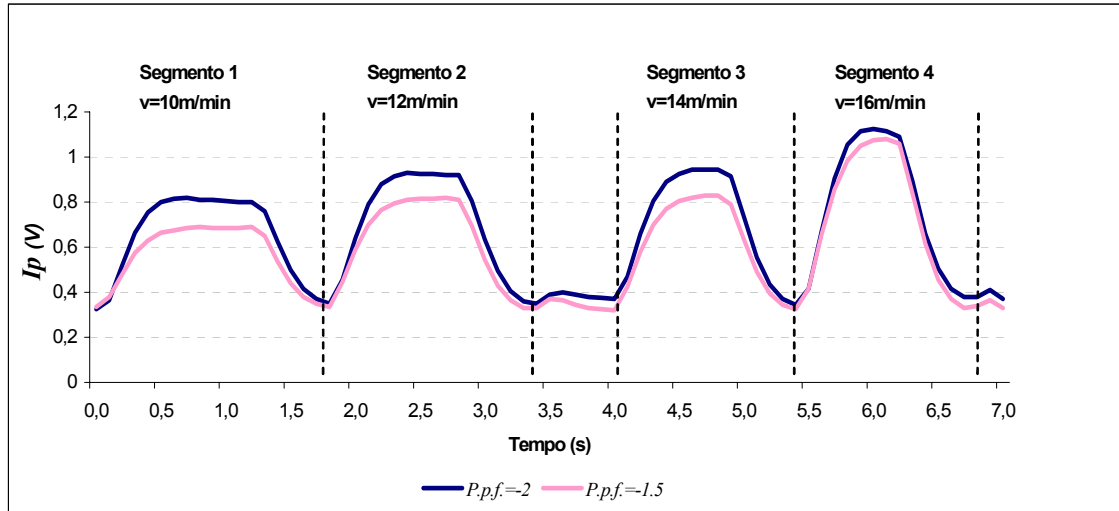


Fig. 68 – Evolução da irradiância do plasma no corte de provetes de aço não ligado

Material: aço não ligado DC03; Espessura: 2mm; Gás: O₂

Este resultado é contraditório dos resultados até agora obtidos, em que um baixo nível de irradiância do plasma está correlacionado com uma boa qualidade de corte. Os resultados da primeira fase de ensaios, mostram que as curvas de irradiância do plasma têm um comportamento muito idêntico, para um ponto focal situado quer em -2mm quer em -1,5mm. Os resultados obtidos têm então de ser explicados à luz do mecanismo de corte por fusão reactiva. Segundo o estudo de Karatas *et al* [56], o ponto focal situado na proximidade da metade da espessura, permite obter uma fenda de corte mais estreita e um corte de melhor qualidade. No entanto, a pressão de oxigénio foi de 1 bar, condição essa que é muito diferente da usada neste trabalho. Segundo Yilbas [68], uma pressão excessiva de oxigénio é prejudicial ao corte por fusão reactiva. Yilbas concluiu que acima de 2,1 bar, a taxa de oxidação satura. Pressões superiores poderão ser necessárias apenas para remoção dos óxidos. Existe um ponto a partir do qual, o aumento de pressão prejudica o corte por fusão reactiva, provavelmente devido ao efeito arrefecedor do jacto. Acima de 1,89 bar, o escoamento atinge velocidades sónicas, o aumento de pressão traduz-se essencialmente numa maior queda de pressão à saída do bico de corte ao invés de uma maior velocidade do jacto e surgem ondas de choque as

quais tornam o processo muito instável [60]. Yilbas [68] refere também, que a velocidade cresce linearmente com o aumento da densidade de potência até 2×10^6 W/m², valor acima da qual a velocidade satura. Conclui-se então, que as condições para a formação do plasma, necessário ao corte de alta velocidade, são antagónicas das condições ideais para o corte por fusão reactiva. Efectivamente o corte de chapa fina com fusão reactiva é feito com potências da ordem de 1 kW, não havendo vantagens na utilização de uma potência superior.

4.2.2 Ensaios em aço inoxidável AISI 304

4.2.2.1. Espessura de 1mm, com azoto

A Tabela 16 apresenta os parâmetros de corte usados nestes ensaios.

Parâmetros		Provete 1	Provete 2	Provete 3
Gás	Tipo	N ₂	N ₂	N ₂
	Pressão	5 bar	5 bar	5 bar
	Caudal	7,2 m ³ /h	7,2 m ³ /h	7,2 m ³ /h
“Stand-off”		1 mm	1 mm	1 mm
Potência		3500W(cw)	3500W(cw)	3500W(cw)
Velocidade		20, 25, 30, 35 m/min	20, 25, 30, 35 m/min	20, 25, 30, 35 m/min
Aceleração		20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³
<i>p.p.f.</i>		-1,5 mm	-1,0 mm	-0,5 mm

Tabela 16 – Parâmetros de corte de provetes de aço inoxidável, com N₂

A Tabela 17 apresenta uma apreciação qualitativa de cada um dos cortes.

<i>p.p.f.</i> \ v	20m/min	25m/min	30m/min	35m/min
-1,5 mm	Boa	Boa	Boa	Má
-1 mm	Má	Boa	Má	Má
0 mm	Boa	Má	Não cortou	Não cortou

Tabela 17 – Resultados de corte de provetes de aço inoxidável AISI 304, com N₂

Os resultados do corte de aço inoxidável AISI 304 são semelhantes aos do aço não ligado DC03, embora com aço inoxidável tenha sido possível cortar com uma velocidade ligeiramente maior, mantendo um bom nível de qualidade da superfície de corte. O corte com velocidade de 30m/min foi obtido com boa qualidade para o aço inoxidável, enquanto que para o aço não ligado, esta velocidade originou uma superfície de corte estriada. A razão para este melhor comportamento do aço inoxidável está associada ao seu menor ponto de fusão e à viscosidade do metal fundido que depende da composição química do material.

Na Fig. 69, são mostradas as curvas de irradiância do plasma formado no corte de cada um dos provetes. Os resultados mostram uma boa correlação entre o nível de irradiância e a qualidade de corte obtida. O corte de boa qualidade foi obtido para um nível de irradiância inferior a 2 V.

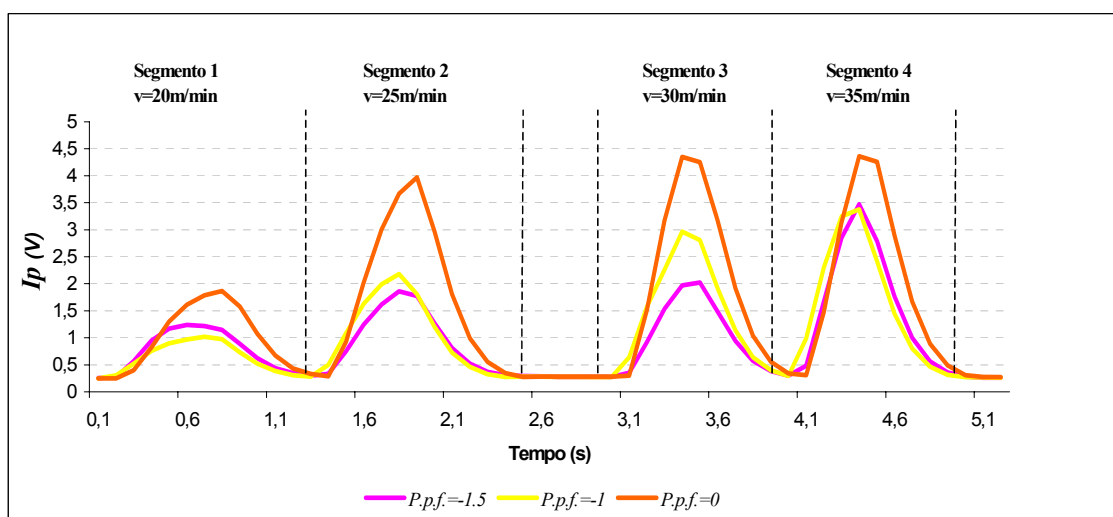


Fig. 69 – Evolução da irradiância do plasma em corte de provetes de aço inoxidável

Material: aço inoxidável AISI 304; Espessura: 1mm; Gás: N_2

4.2.2.2. Espessura de 2mm, com azoto

A Tabela 18 apresenta os parâmetros de corte usados neste ensaio.

Parâmetros		Provete 1	Provete 2
Gás	Tipo	N ₂	N ₂
	Pressão	8 bar	8 bar
	Caudal	10,83 m ³ /h	10,83 m ³ /h
“Stand-off”		1 mm	1 mm
Potência		3500W(cw)	3500W(cw)
Velocidade		10, 12, 14, 16 m/min	10, 12, 14, 16 m/min
Aceleração		20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³
<i>p.p.f.</i>		-1,5 mm	-2,0 mm

Tabela 18 – Parâmetros de corte de provetes de aço inoxidável, com N₂

A Tabela 19 mostra a apreciação qualitativa dos resultados de corte.

<i>p.p.f.</i> \ v	10m/min	12m/min	14m/min	16m/min
-2mm	Má	Má	Muito pequena rebarba	Não cortou
-1,5mm	Má	Má	Má	Não cortou

Tabela 19 - Resultados de corte de aço inoxidável AISI 304 com N₂

Da Tabela 19, observa-se que no corte de aço inoxidável de 2mm, não foi possível a obtenção de um corte totalmente isento de rebarba. A melhor situação de corte é para uma velocidade de 14m/min e um ponto focal situado na superfície inferior da chapa.

Na Fig. 70, mostram-se as curvas de irradiância do plasma formado no corte dos provetes ensaiados.

Os resultados deste ensaio são inesperados. Atendendo aos resultados obtidos para aço não ligado (ponto 4.1.1.4), seria de esperar uma maior irradiância do plasma formado no corte com o ponto focal situado em -2mm do que em -1,5mm. Em particular, a curva de irradiância para a posição de ponto focal em -1,5mm, é difícil de explicar.

Na Fig. 71, é apresentada a posição do eixo Z e o sinal do sensor capacitivo. Apenas no segmento 3, se nota alguma variação destas variáveis. Por outro lado, a menor irradiância coincide precisamente com o corte deste segmento. Uma explicação plausível é que o sensor capacitivo tenha sido impedido de manter correctamente a distância do bico à chapa, por influência da distorção ou movimento da peça adjacente,

no corte dos segmentos 1, 2 e 4. Esta situação é frequente no corte industrial, sobretudo quando a distância entre peças é pequena.

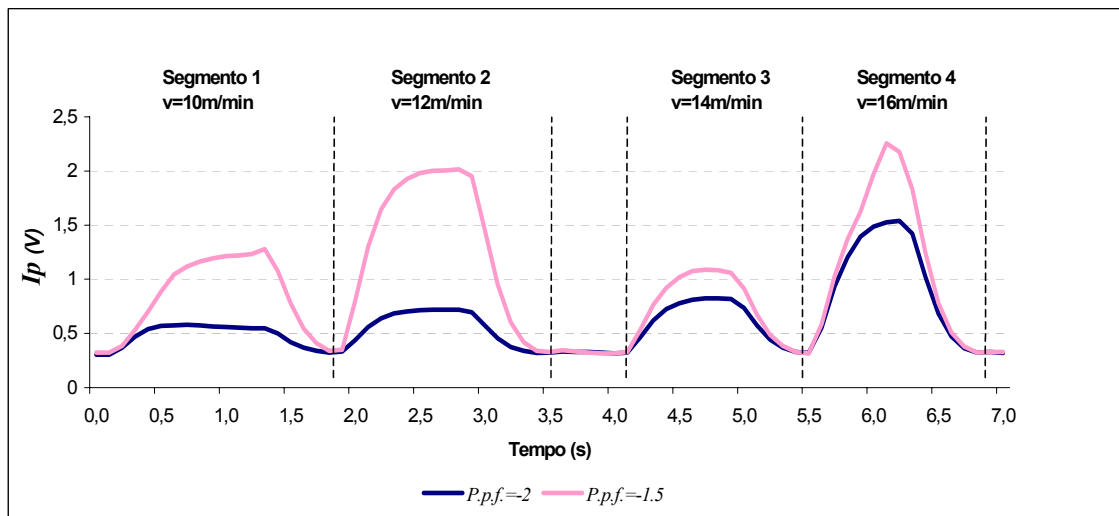


Fig. 70 – Evolução da irradiância do plasma em corte de provetes de aço inoxidável

Material: aço inoxidável AISI 304; Espessura: 2mm; Gás: N₂

Um facto não explicado é a discrepância de resultados obtidos, em termos das irradiâncias verificadas, entre o aço não ligado e o aço inoxidável, contrariando a boa correspondência de resultados obtidos para o corte de chapa de 1mm.

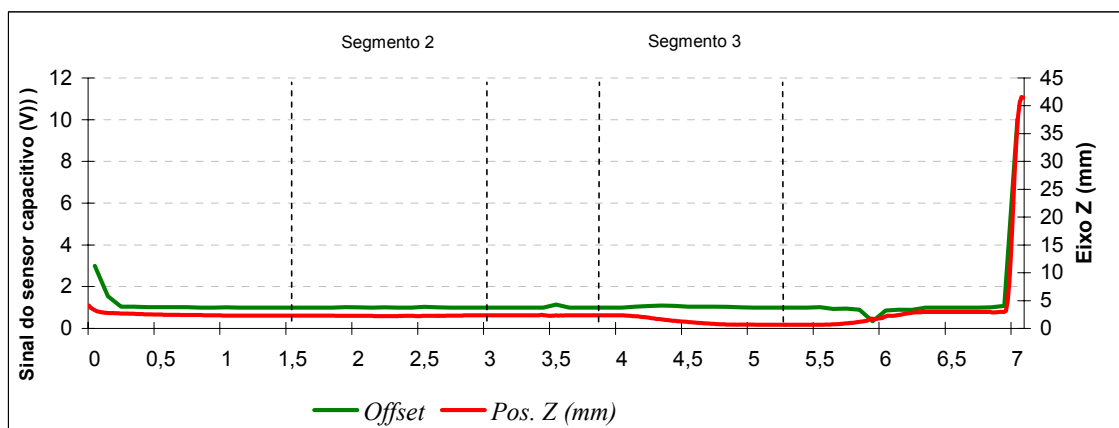


Fig. 71 - Material: aço inoxidável AISI 304; Espessura: 2mm; Gás: N₂

P.p.f.=1,5 mm

4.2.3 Ensaios em alumínio AISI 5754

4.2.3.1. Espessura de 1mm, com azoto

A Tabela 20 apresenta os parâmetros de corte usados neste ensaio.

Parâmetros		Provete 1	Provete 2	Provete 3
Gás	Tipo	N ₂	N ₂	N ₂
	Pressão	5 bar	5 bar	5 bar
	Caudal	7,2 m ³ /h	7,2 m ³ /h	7,2 m ³ /h
“Stand-off”		1 mm	1 mm	1 mm
Potência		3500W(cw)	3500W(cw)	3500W(cw)
Velocidade		30, 40, 50, 60 m/min	30, 40, 50, 60 m/min	30, 40, 50, 60 m/min
Aceleração		20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³
<i>p.p.f.</i>		-2 mm	-1,5 mm	-1 mm

Tabela 20 – Parâmetros de corte de provetes de alumínio, com N₂

Da Tabela 21 verifica-se que é possível obter um corte de boa qualidade, para uma velocidade de máxima 50m/min, com o ponto focal situado em -2mm.

$\begin{matrix} v \\ p.p.f. \end{matrix}$	30m/min	40m/min	50m/min	60m/min
-2mm	Boa	Boa	Boa	Má
-1,5 mm	Boa	Boa	Não cortou	Não cortou
-1 mm	Boa	Boa	Má	Não cortou

Tabela 21 – Resultados de corte de provetes de alumínio AISI 5754, com N₂

A Fig. 72 apresenta a evolução da irradiância do plasma, para diferentes velocidades e posições do ponto focal. Até aos 40m/min, o comportamento das curvas de irradiância é normal e pode-se estabelecer que até 1,2 V de irradiância o corte pode ser feito com qualidade. No corte, efectuado com boa qualidade, à velocidade de 50m/min e com um ponto focal em -2mm, a irradiância ronda os 1,4 V, valor

francamente superior a 1V verificado para um ponto focal situado em $-1,5\text{mm}$, com velocidade idêntica, para a qual não foi possível efectuar o corte.

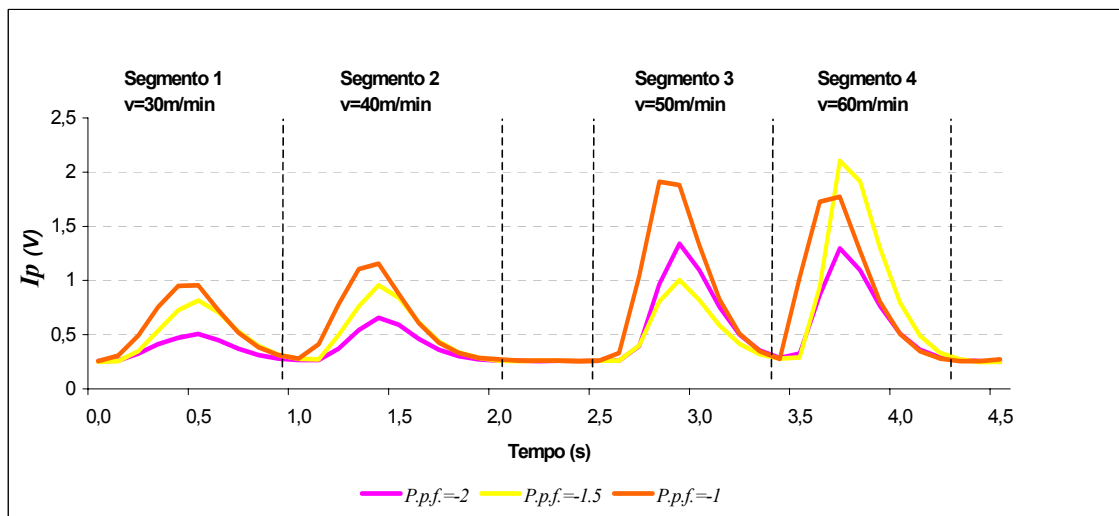


Fig. 72 – Evolução da irradiância do plasma em de provetes de alumínio

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: N_2

O comportamento anormal das curvas de irradiância, para uma velocidade de corte superior a 40 m/min, é justificado pelas distorções sofridas pela chapa e pela incapacidade, por parte do eixo Z, em manter constante a distância do bico à chapa (Fig. 73). O aparecimento das distorções, deve-se, neste caso, à flexibilidade e leveza da chapa, a qual, após os primeiros cortes, se torna altamente instável por acção do gás de assistência.

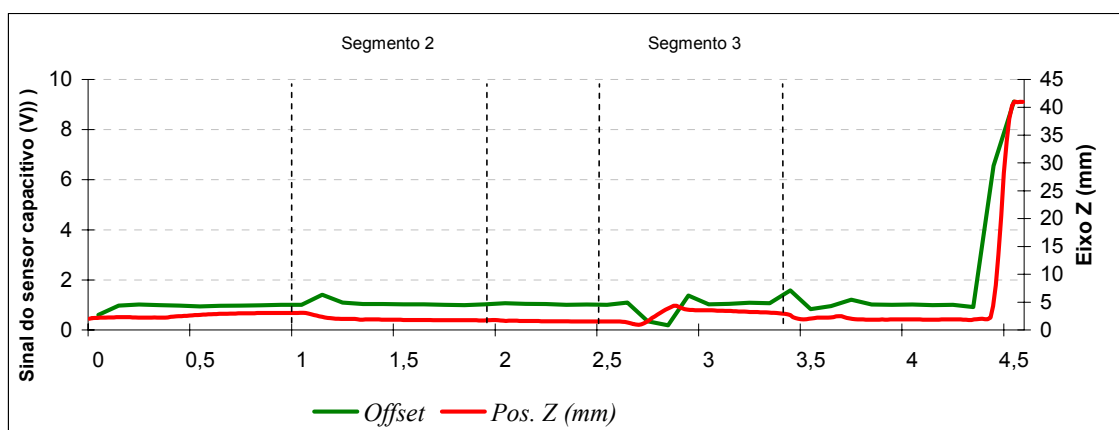


Fig. 73 – Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: N_2

$P.p.f. = -1,5\text{ mm}$

4.2.3.2. Espessura de 2mm, com azoto

A Tabela 22 apresenta os parâmetros de corte usados neste ensaio.

Parâmetros		Provete 1	Provete 2
Gás	Tipo	N ₂	N ₂
	Pressão	8 bar	8 bar
	Caudal	10,83 m ³ /h	10,83 m ³ /h
“Stand-off”		1 mm	1 mm
Potência		3500W(cw)	3500W(cw)
Velocidade		16, 18, 20, 22 m/min	16, 18, 20, 22 m/min
Aceleração		20 m.s ⁻³	20 m.s ⁻³
<i>p.p.f.</i>		-1,5 mm	-2,0 mm

Tabela 22 – Parâmetros de corte de provetes de alumínio, com N₂

Da Tabela 23, verifica-se que para a espessura de 2mm, foi possível cortar em boas condições para 16m/min e um ponto focal situado em -2mm ou em -1,5mm.

$\begin{matrix} v \\ p.p.f. \end{matrix}$	16m/min	18m/min	20m/min	22m/min
-2mm	Boa	Pequena rebarba	Má	Não cortou
-1,5mm	Boa	Não cortou	Não cortou	Não cortou

Tabela 23 - Resultados de corte de provetes de alumínio AISI 5754, com N₂

A Fig. 74 apresenta a evolução da irradiância do plasma, para diferentes velocidades e posições do ponto focal. O nível máximo de irradiância para um corte de qualidade pode ser estabelecido em 2V. O pico de irradiância no segmento 3 da curva correspondente à posição do ponto focal em -1,5mm, deve-se a flutuações da distância do bico à chapa, conforme mostrado na Fig. 75.

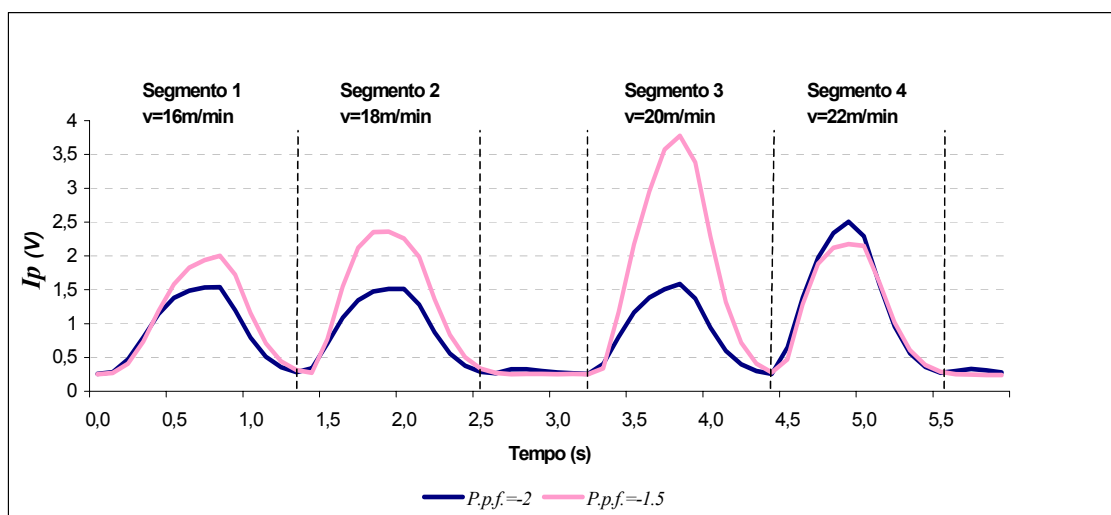


Fig. 74 - Evolução da irradiância para corte de provetes de alumínio

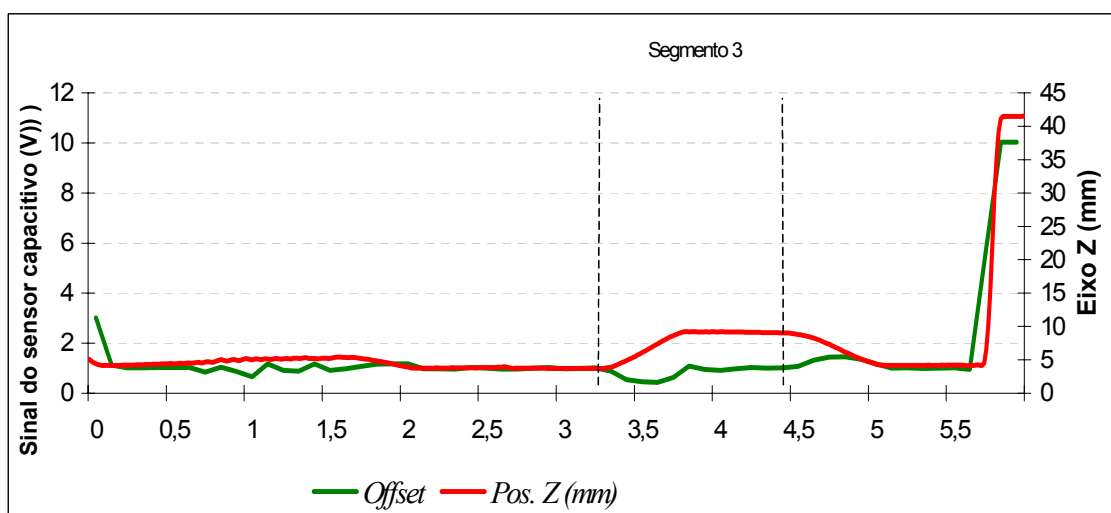
 Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: N_2


Fig. 75 – Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”

 Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: N_2
 $P.p.f.=-1,5\text{ mm}$

4.2.3.3. Espessura de 1mm, com oxigênio

Em relação aos ensaios anteriores efectuados para alumínio de 1mm, todos os parâmetros se mantiveram, na realização destes ensaios, com a excepção do gás de assistência que foi o oxigênio.

A Tabela 24 resume a apreciação visual das qualidades de corte.

$p.p.f.$ \ v	30m/min	40m/min	50m/min	80m/min
-2 mm	Boa	Boa	Boa	Má
-1,5 mm	Boa	Boa	Boa	Não cortou
-1 mm	Boa	Boa	Não cortou	Não cortou

 Tabela 24 - Resultados de corte de alumínio AISI 5754 com O_2

Da Tabela 24 observa-se que foi possível efectuar o corte a 80 m/min, para um ponto focal situado em -2mm , embora com uma má superfície de corte. Para este caso, a irradiância do plasma medida ronda os 2 V, como se observa na Fig. 74. O corte a velocidade de 50 m/min foi possível para duas posições do ponto focal diferentes, medindo-se um sinal de irradiância próximo de 1,5 V. Por estes resultados, é previsível que para um ponto focal situado em -2mm , seja possível cortar com boa qualidade para uma velocidade de corte compreendida entre 50 e 80 m/min.

Como referido anteriormente, o aumento de velocidade torna o corte mais instável. Na Fig. 77, vemos o movimento do eixo Z face ao sinal do sensor capacitivo. A variação da distância do bico à chapa implica uma variação da localização do ponto focal, afectando por isso a formação de plasma. É impossível estabelecer um padrão para tentar prever a distorção que a chapa vai sofrer, mas dos resultados obtidos nestes ensaios, pode-se concluir que o oxigénio tem uma contribuição importante para o aumento de distorção. Por outro lado, o processo é mais tolerante, pois mesmo em situações de grande instabilidade, como a que é apresentada na Fig. 77, é possível efectuar um corte com boa qualidade.

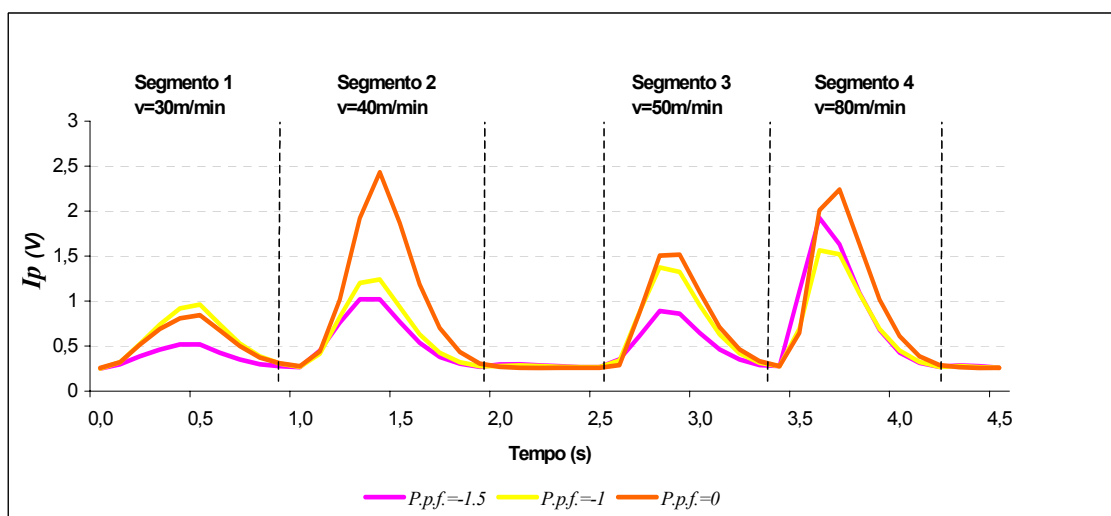


Fig. 76 – Evolução da irradiância em corte de provetes de alumínio

 Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: O_2

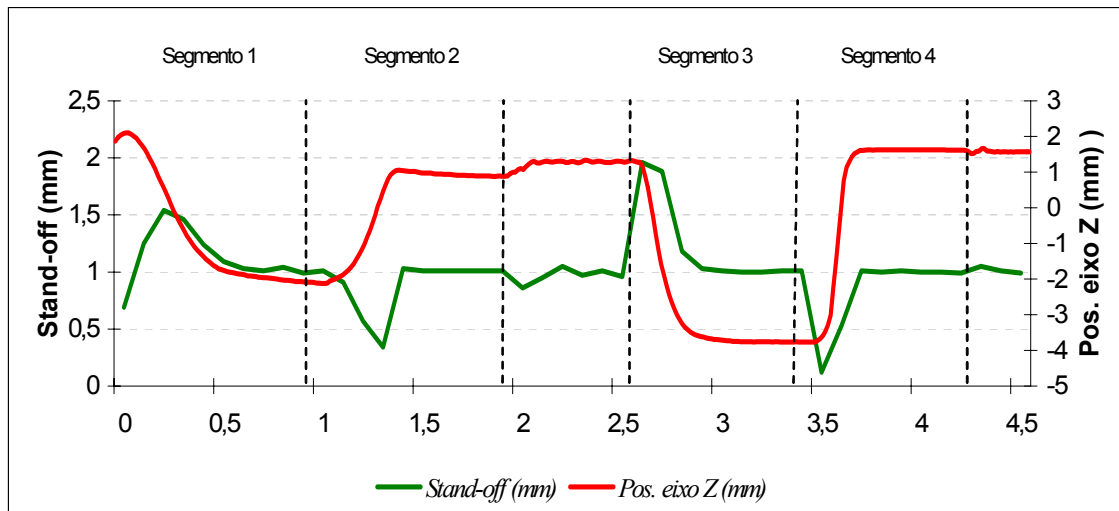


Fig. 77 - Posição da cabeça de corte (eixo Z) vs “stand-off”

Material: alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: O₂

P.p.f. = -1 mm

Outra conclusão importante a tirar, é o facto de que a irradiância do plasma não traduz, por si só, de forma inequívoca, se o corte é efectuado em boas condições ou não. Prova disso mesmo, é o facto de que, para níveis próximos de irradiância (segmentos 2 e 4 da curva mostrada na Fig. 76, correspondente a uma posição do ponto focal em 0mm) é possível cortar com boa qualidade, com velocidade de 40 m/min, ou não conseguir efectuar o corte, com velocidade de 80 m/min (ver Tabela 24). Para obter uma boa correlação entre irradiância do plasma e qualidade de corte, é necessário que a distância do bico à chapa seja mantida constante. Como em corte de alta velocidade é muito difícil assegurar a distância constante do bico à chapa, devido às limitações dinâmicas do eixo Z, é importante ter um sistema que possa variar a velocidade de processamento em função do sinal do sensor capacitivo de modo a permitir explorar ao máximo as potencialidades deste tipo de corte.

4.2.3.4. Espessura de 2mm, com oxigénio

Nestes ensaios foram mantidos todos os parâmetros do anterior ensaio de alumínio de 2mm, alterando-se apenas o gás de assistência de azoto para oxigénio. A Tabela 25 mostra uma análise qualitativa da qualidade da superfície de corte.

$p.p.f.$ \ v	20m/min	23m/min	25m/min	30m/min
-2 mm	Boa	Boa	Má	Não cortou
-1,5 mm	Boa	Má	Não cortou	Não cortou

Tabela 25 – Resultados de corte para alumínio AISI 5754 com O₂

Da Tabela 25, verifica-se que foi possível cortar a 23 m/min para um ponto focal situado em -2mm. A irradiância verificada para esta situação foi cerca de 1,2 V. Os restantes resultados não merecem particular análise e estão de acordo com a primeira fase de ensaios.

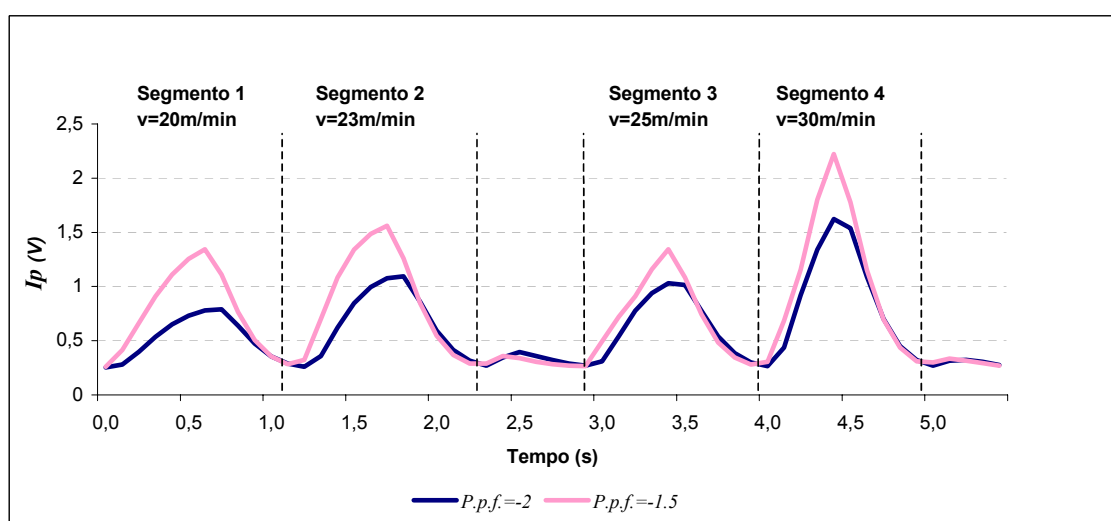


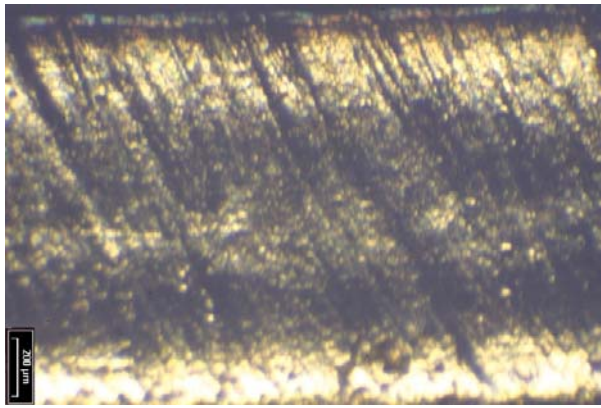
Fig. 78 – Evolução da irradiância com o tempo

Material: Alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: N₂

4.2.4 Análise da qualidade do corte

A norma DIN EN ISO 9013:2000 define a terminologia e estabelece os critérios de avaliação da qualidade de superfícies e tolerância dimensional aplicável a corte laser de materiais metálicos com espessuras que variam entre 0,5 e 40 mm.

Nas Fig. 79 a Fig. 82, apresentam-se fotomicrografias de superfícies de corte obtidas por laser. No corte de aço não ligado com azoto, a superfície de corte apresenta-se limpa e isenta de óxidos (Fig. 79). A superfície de corte torna-se mais rugosa com o aumento da velocidade de corte.

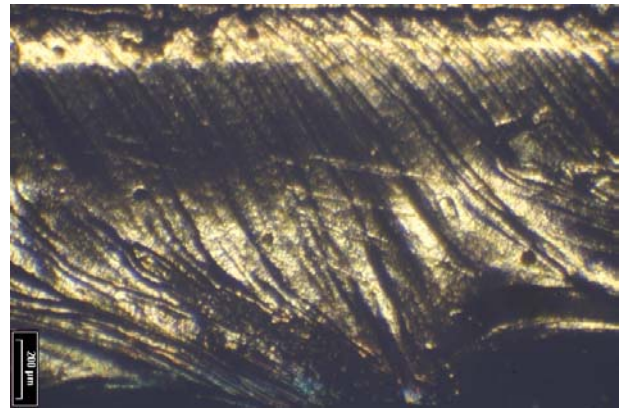


a) Boa superfície de corte

Rz= 0,73 µm

P.p.f.: -1mm

v=25 m/min



b) Superfície de corte estriada

Rz= 3,27 µm

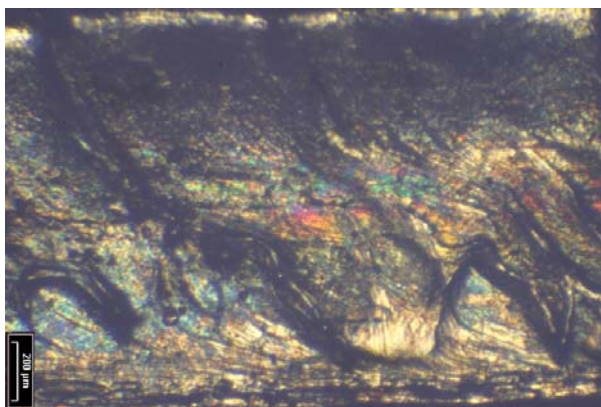
P.p.f.: -1,5mm

v=30 m/min

Fig. 79 – Superfície de corte

Material: Aço não ligado DC03; Espessura: 1mm; Gás:N₂

No corte de aço não ligado com oxigénio, observa-se a existência de óxidos aderentes à superfície de corte que não são removidos pelo gás de assistência (Fig. 80). Segundo Preißig *et al* [1], no corte de alta velocidade, observa-se uma projecção do material fundido contra as paredes da fenda de corte o que, juntamente com a maior viscosidade dos óxidos formados na reacção exotérmica, explica a adesão dos mesmos à superfície de corte. Os óxidos são formados em gamas distintas de temperatura visíveis pela diferente coloração mostrada nas figuras. A rugosidade das superfícies é baixa e pouco dependente da velocidade.

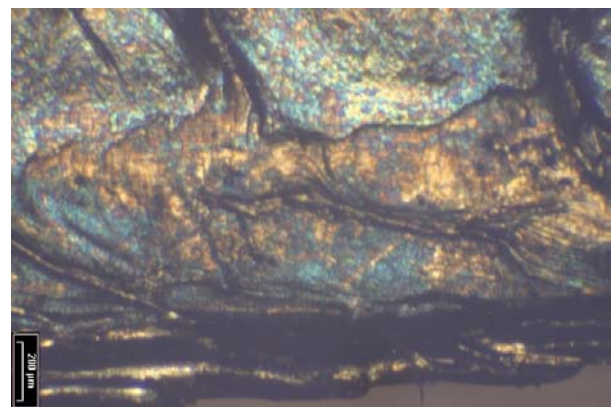


a) Boa superfície de corte

Rz= 2,29 µm

P.p.f.: -1mm

v=20 m/min



b) Superfície de corte estriada

Rz= 2,69 µm

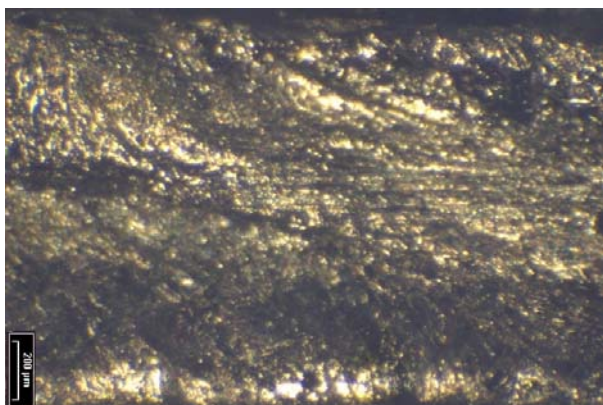
P.p.f.: 0mm

v=25 m/min

Fig. 80 – Superfície de corte

Material: Aço não ligado DC03; Espessura: 1mm; Gás:O₂

A superfície de corte de alumínio com azoto não apresenta diferenças significativas em relação à superfície de corte com oxigénio (Fig. 81 e Fig. 82). Embora a olho nu seja visível uma diferença de acabamento de corte, a nível macroscópico não se distinguem mecanismos de corte diferentes e os valores de R_z estão sempre dentro dos limites máximos permitidos pela norma. Tal como esperado, um aumento de velocidade aumenta a rugosidade.

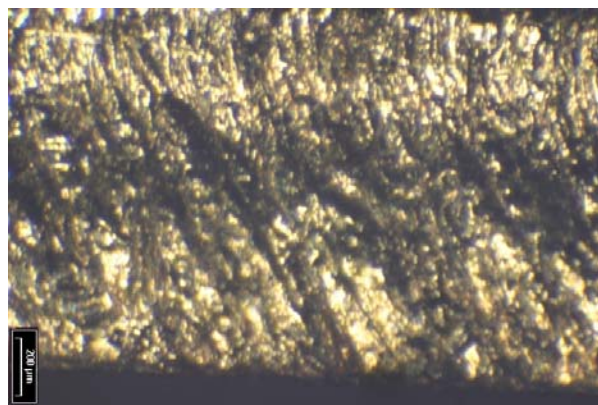


a) Boa superfície de corte

$R_z = 2,41 \mu\text{m}$

P.p.f.: -1mm

$v = 40 \text{ m/min}$



b) Superfície de corte estriada

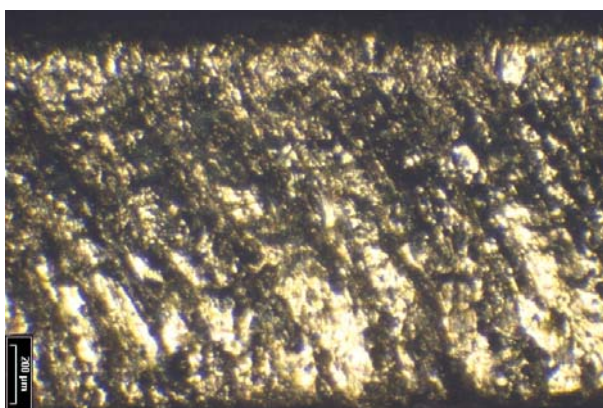
$R_z = 7,86 \mu\text{m}$

P.p.f.: -1mm

$v = 50 \text{ m/min}$

Fig. 81 – Superfície de corte

Material: Alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: N_2

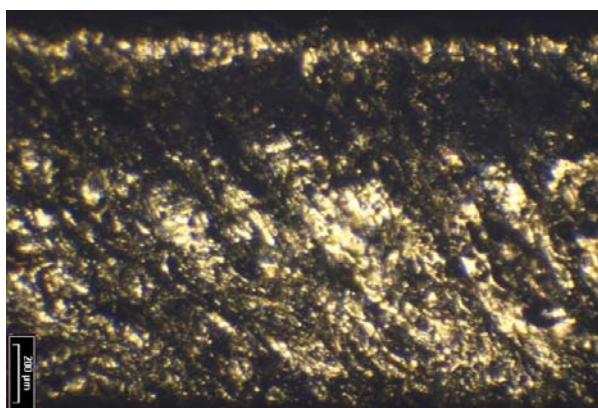


a) Boa superfície de corte

$R_z = 3,48 \mu\text{m}$

P.p.f.: -2mm

$v = 50 \text{ m/min}$



b) Superfície de corte estriada

$R_z = 5,26 \mu\text{m}$

P.p.f.: -2mm

$v = 80 \text{ m/min}$

Fig. 82 – Superfície de corte

Material: Alumínio AISI 5754; Espessura: 1mm; Gás: O_2

Aumentando a espessura do material, no caso do corte de aço não ligado com azoto, observa-se uma maior dificuldade na expulsão da matéria em fusão com um aumento de velocidade de corte (Fig. 83).



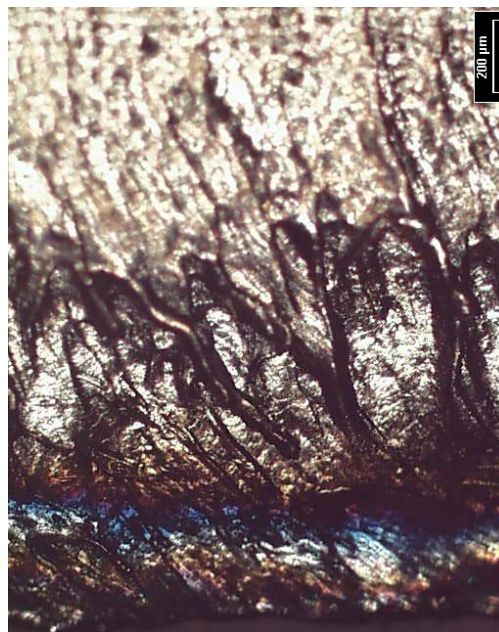
a) Boa superfície de corte

Rz= 2,06 μm (metade superior)

Rz= 2,12 μm (metade inferior)

P.p.f.: -1,5mm

v=10 m/min



b) Superfície de corte estriada

Rz= 3,31 μm (metade superior)

Rz= 3,51 μm (metade inferior)

P.p.f.: -2mm

v=12 m/min

Fig. 83 – Superfície de corte

Material: Aço não ligado DC03; Espessura: 2mm; Gás: N_2

No corte do mesmo material e espessura, mas com oxigênio, é visível uma zona de transição em que, claramente, é difícil remover o material fundido na zona inferior da superfície de corte e em que se dá um aumento considerável da rugosidade (Fig. 84). Essa dificuldade pode ser justificada pela existência de turbulência no escoamento do gás. Por outro lado, é de referir que não se observam óxidos aderentes à superfície de corte, possivelmente devido à maior capacidade de expulsão de matéria fundida associada à maior pressão do gás de assistência.

O efeito da variação da posição do ponto focal na superfície de corte é apresentado na Fig. 85, para o caso do corte de aço inoxidável de 2mm, com azoto. Um ponto focal situado mais próximo da aresta inferior alarga a fenda de corte facilitando o escoamento de gás permitindo a obtenção de uma melhor superfície de corte. Por outro lado, posições do ponto focal superiores propiciam a formação de rebarbas longas e superfícies muito rugosas.



Boa superfície de corte

Rz= 1,30 μm (metade superior)

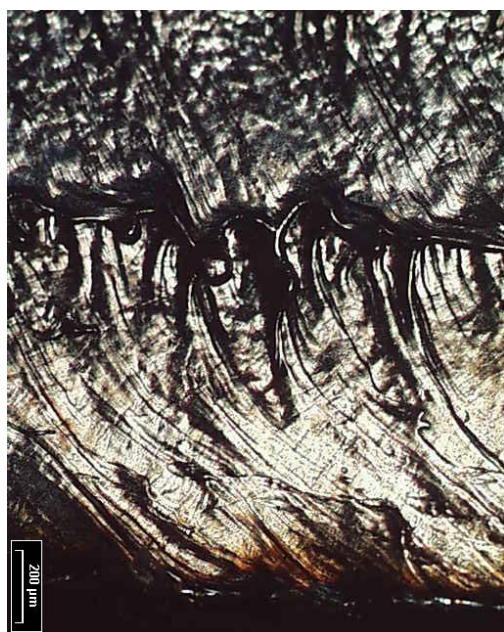
Rz= 3,07 μm (metade inferior)

P.p.f.: -2mm

v=14 m/min

Fig. 84 – Superfície de corte

Material: Aço não ligado DC03; Espessura: 2mm; Gás:O₂



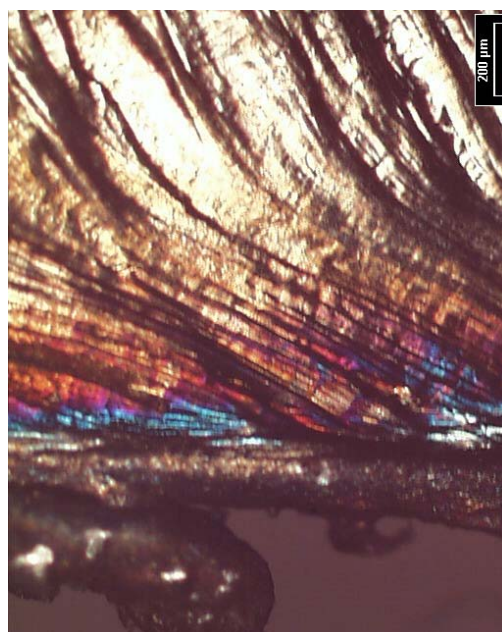
a) Boa superfície de corte

Rz= 3,30 μm (metade superior)

Rz= 4,89 μm (metade inferior)

P.p.f.: -2mm

v=14 m/min



b) Superfície de corte estriada

Rz= 7,31 μm (metade superior)

Rz= 7,61 μm (metade inferior)

P.p.f.: -1,5mm

v=14 m/min

Fig. 85 – Superfície de corte

Material: Aço inoxidável AISI 304; Espessura: 2mm; Gás:N₂

À semelhança dos resultados obtidos para o corte de aço não ligado de 2mm com azoto, também no caso do alumínio, é claramente visível uma zona de transição em que se torna mais difícil a expulsão da matéria em fusão com um muito significativo aumento de rugosidade (Fig. 86).



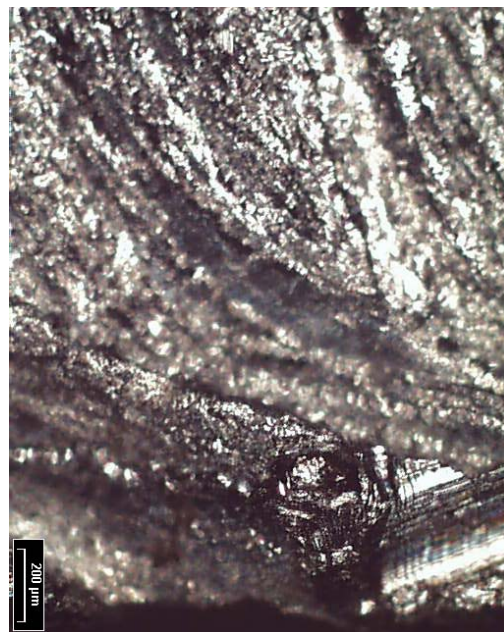
a) Boa superfície de corte

Rz= 5,76 μm (metade superior)

Rz= 6,31 μm (metade inferior)

P.p.f.: -2mm

v=16 m/min



b) Superfície de corte estriada

Rz= 8,53 μm (metade superior)

Rz= 14,59 μm (metade inferior)

P.p.f.: -2mm

v=20 m/min

Fig. 86 – Superfície de corte

Material: Alumínio AISI 5754; Espessura: 2mm; Gás: N₂

4.2.5 Análise da eficiência do corte

A eficiência do corte é frequentemente estimada pela quantidade de energia necessária para remover uma unidade de volume de material.

O processo de corte por fusão pode ser descrito de forma aproximada, considerando que toda a energia é transferida sem perdas significativas por condução. Uma vez que a zona afectada termicamente, para um corte de boa qualidade, é inferior a alguns μm , esta simplificação não é muito grosseira, embora o seja para materiais com boa condutividade térmica, como o alumínio. Por este motivo, esta análise foi limitada ao aço não ligado.

Além da largura da fenda de corte, que depende do ponto focal e até certo ponto, da velocidade de corte e do coeficiente de acoplamento, todas as restantes variáveis consideradas no processo são constantes dependentes do material. Assim é razoável esperar que a relação $(P/e \cdot v)$ seja constante para um dado material e um dado feixe laser [8]. Assim, no sentido de tentar avaliar a eficiência do corte de alta velocidade face ao corte convencional foi adoptada a seguinte hipótese:

$$\frac{P}{e} = A \cdot v \quad \text{Eq. 13}$$

em que A é uma constante de proporcionalidade, v é a velocidade, e é a espessura do material e P é a potência.

Fazendo a representação gráfica de P/e em função de v (Fig. 87), há uma inflexão no declive da curva, indicativa de que o modo de corte sofre alteração.

Efectivamente, nesta simplificação, a constante A inclui não só as propriedades ópticas e físicas do material mas também um parâmetro relativo à eficiência do corte e é este último que se altera com a mudança do mecanismo de corte.

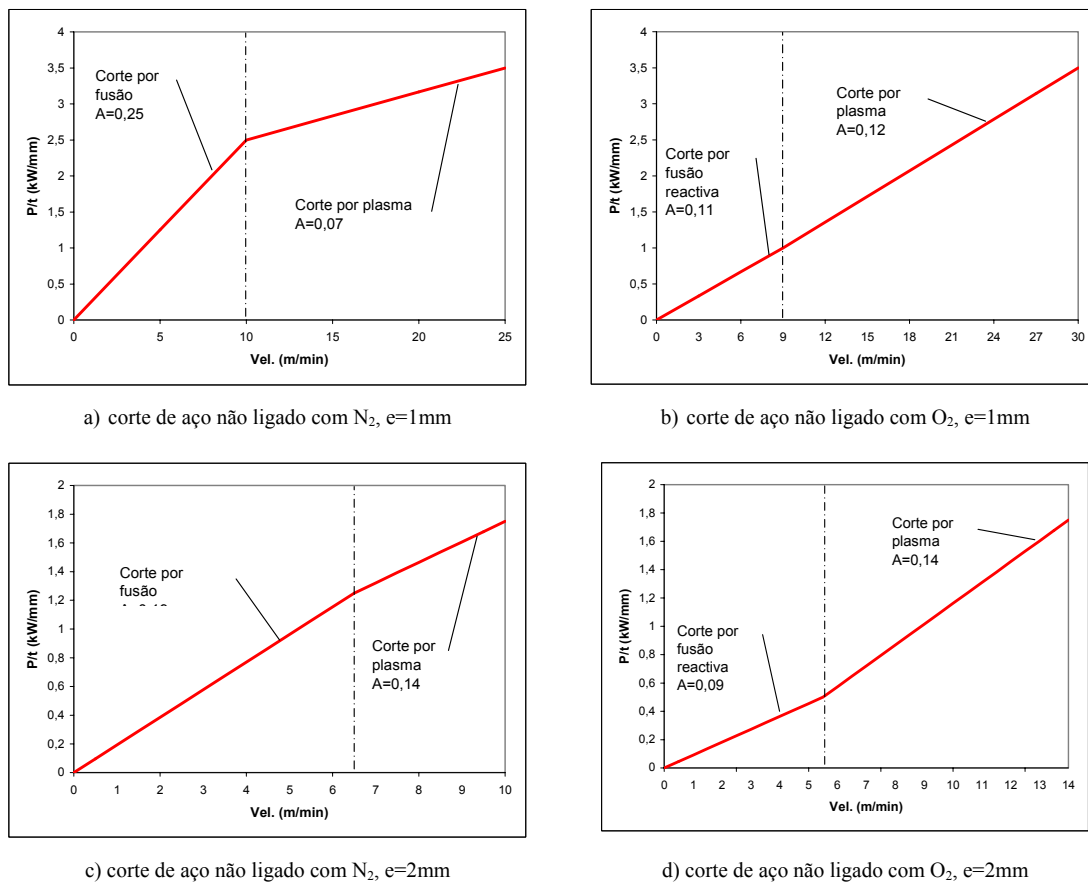


Fig. 87 - Análise da eficiência do corte de aço não ligado

Da Fig. 87, observa-se que o corte por plasma é significativamente mais eficiente que o corte por fusão e menos eficiente que o corte por fusão reactiva, para o material considerado. A eficiência do corte por plasma diminui com o aumento de espessura do material. O ganho mais significativo é portanto no caso do corte de com azoto na espessura de 1mm, em que a eficiência aumentou 72%.

Por outro lado, na curva do corte com oxigénio, observa-se um aumento do declive o qual se deve a uma menos eficiente reacção exotérmica por acção do plasma.

4.2.6 Conclusões sobre a segunda fase de ensaios

Desta fase de ensaios, podemos concluir que:

- Existe uma velocidade crítica, dependente da espessura e do material, em corte por plasma com azoto, a partir da qual o corte só é possível para um ponto focal negativo, colocado na superfície inferior da chapa ou abaixo dela. Estas posições de ponto focal são as que apresentam máxima sensibilidade do plasma às variações de velocidade;
- Em corte por plasma com azoto, é possível correlacionar empiricamente a irradiância do plasma formado com a qualidade do corte, para uma gama bem definida de velocidades, óptimas para o de corte por plasma. Uma variação de velocidade acima ou abaixo dos valores da gama óptima e uma variação da posição do ponto focal influenciam o processo, podendo invalidar a correlação. Em condições de aplicação da correlação, pode-se dizer que existe um valor óptimo de irradiância do plasma, dependente do material e espessura, acima do qual o corte se deteriorará até à sua extinção. Estes valores óptimos são muito semelhantes para o corte de aço não ligado e aço inoxidável;
- Em corte por plasma com azoto de aço não ligado e de aço inoxidável, em que o ponto focal está situado na superfície inferior da chapa ou abaixo dela, pode dizer-se de forma aproximada, que a razão entre a irradiância óptima do plasma e a velocidade óptima de corte, se mantém para diferentes espessuras. Em corte de alumínio, não existe essa relação,

levando à conclusão que no caso do alumínio, a evaporação do substrato é mais pronunciada e aumenta com o aumento da espessura;

- O mecanismo de corte por plasma com azoto é muito mais eficiente do que o mecanismo de corte por fusão, havendo um ganho energético considerável. Este deve-se às características do plasma, as quais permitem um acoplamento mais eficaz de energia na peça, em particular em materiais altamente reflectivos, como o alumínio;
- a utilização do oxigénio como gás de assistência permite alcançar uma velocidade de processamento mais elevada do que com azoto, devido à existência da reacção exotérmica. Os efeitos prejudiciais são a maior distorção sofrida pela chapa e uma menor qualidade de corte, sobretudo em aço não ligado;
- a conjugação do mecanismo de corte por plasma com o mecanismo de corte por fusão reactiva, diminui a eficiência do corte de alta velocidade de aço não ligado com oxigénio quando comparado com o corte clássico por fusão reactiva;
- havendo por isso, neste caso, nenhum ganho energético no corte com plasma;
- a existência da reacção exotérmica torna o processo de fusão reactiva preponderante sobre o processo de corte por plasma com oxigénio, em corte de aço não ligado, tornando o processo resultante da conjugação de ambos os mecanismos, mais tolerante a variações do ponto focal do que o corte por plasma com azoto, devido ao acréscimo de energia proveniente da reacção exotérmica. Pelo mesmo motivo, não é possível estabelecer uma correlação entre o nível medido da irradiância do plasma e a qualidade do corte obtido;
- a monitorização do plasma não é suficiente para garantir a obtenção de um corte de qualidade. Foi provado que a posição do ponto focal e a velocidade alteram a irradiância do plasma sem alterarem necessariamente a qualidade do corte. Este facto nota-se sobretudo no corte com oxigénio. Para que a monitorização de plasma possa ser eficaz, esta tem de agir em conjunto com uma monitorização da posição do ponto focal e a velocidade

de corte não deve variar além de certos limites, dentro dos quais o processo de corte por plasma se possa considerar estável. A monitorização do ponto focal é necessária devido, sobretudo, às ondulações e distorções da chapa. Garantindo a distância do bico à chapa, garante-se o correcto posicionamento do ponto focal. Assim, associando um sistema capaz de medir a razão entre o deslocamento do eixo Z e o avanço do corte, poder-se-ia regular a velocidade em função dessa razão e ultrapassar as limitações provocadas pela inércia do eixo Z.

5. Capítulo V – Análise económica

5.1. *Análise económica comparativa entre o corte laser de alta velocidade e o corte laser convencional*

Uma das principais vantagens do corte laser de alta velocidade é o facto de este processo de corte aliar uma velocidade mais elevada a um consumo de gás mais baixo do que o tradicional corte por fusão. No caso do corte por fusão reactiva de aço não ligado, essa vantagem é menos evidente.

Na Eq. 14 e na Eq. 15, apresentam-se fórmulas de cálculo dos caudais de oxigénio e azoto, respectivamente, em que d é o diâmetro do bico de corte e P é a pressão do gás.

$$Q = 0.504 \cdot d^2 \cdot (1 + P) \quad \text{Eq. 14}$$

$$Q = 0.535 \cdot d^2 \cdot (1 + P) \quad \text{Eq. 15}$$

Na Tabela 26, apresentam-se algumas estimativas de custos de corte laser a alta velocidade.

Material e espessura:	Tipo de Gás:	Consumo de gás (m ³ /h)	Velocidade de Corte (m/min):	Custo por hora (€/hora):	Custo por metro (€/m):
DC03, 1mm	N ₂	7,2	25	57,74	0,04
DC03, 2mm	N ₂	10,83	10	58,10	0,1
DC03, 1mm	O ₂	7,2	30	57,74	0,03
DC03, 2mm	O ₂	10,83	14	58,10	0,07
AISI 304, 1mm	N ₂	7,2	30	57,74	0,03
AISI 304, 2mm	N ₂	10,83	14	58,10	0,07
AISI5754, 1mm	N ₂	7,2	50	57,74	0,02
AISI5754, 2mm	N ₂	10,83	16	58,10	0,06
AISI5754, 1mm	O ₂	7,2	50	57,74	0,02
AISI5754, 2mm	O ₂	10,83	23	58,10	0,04

Tabela 26 – Custos de processamento no corte laser com plasma [69]

Os custos apresentados na tabela anterior podem ser decompostos em várias parcelas, conforme se mostra na Fig. 88.

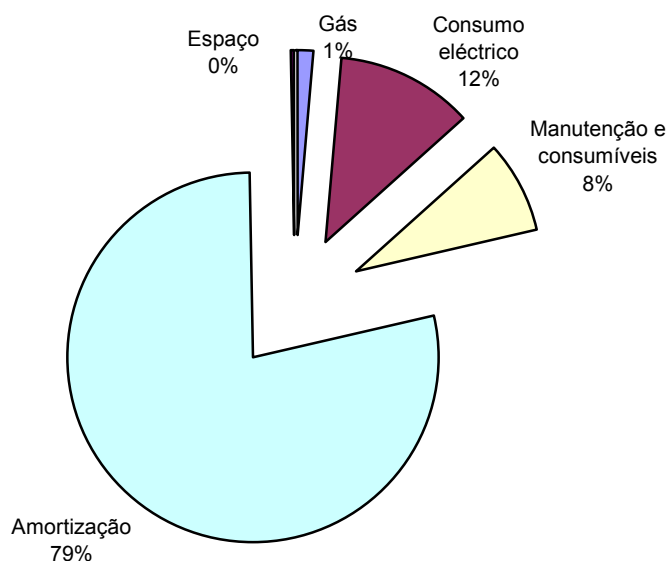


Fig. 88 - Parcelas de custo no corte laser de alta velocidade

Na Tabela 27 são mostradas as mesmas estimativas para corte por laser convencional.

Material e espessura:	Tipo de Gás:	Consumo de gás (m ³ /h)	Velocidade de Corte (m/min):	Custo por hora (€/hora):	Custo por metro (€/m):
DC03, 1mm	N ₂	12	10	56,47	0,09
DC03, 2mm	N ₂	13,2	7	56,59	0,13
DC03, 1mm	O ₂	3	8,5	52,28	0,10
DC03, 2mm	O ₂	2,5	7	52,28	0,12
AISI 304, 1mm	N ₂	12	10	56,47	0,09
AISI 304, 2mm	N ₂	13,2	7	56,59	0,13
AISI5754, 1mm	N ₂	12	12	56,47	0,08
AISI5754, 2mm	N ₂	7,2	7,2	58,10	0,13

Tabela 27 – Custos de processamento no corte convencional [69]

Na Fig. 89 e na Fig. 90, são mostrados os custos decompostos em diferentes parcelas.



Fig. 89 - Parcelas de custo no corte por fusão reactiva de aço não ligado, em espessura de 1mm [69]

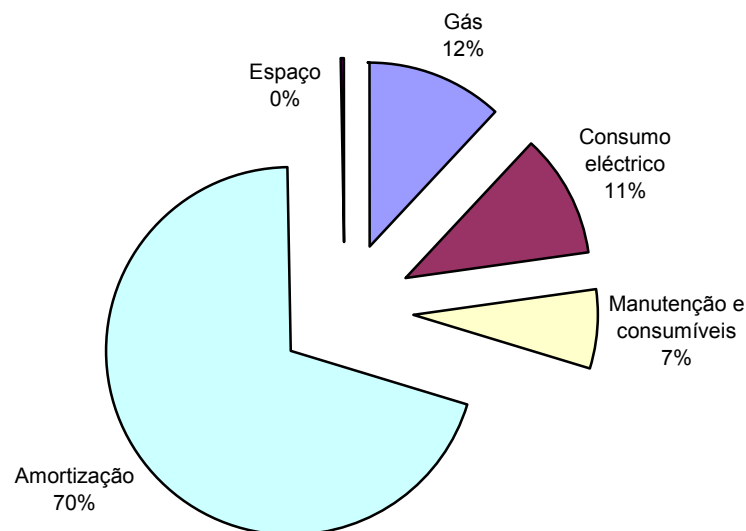


Fig. 90 - Parcelas de custo de corte por fusão de aço não ligado, em espessura de 1mm [69]

Comparando a Fig. 88 com a Fig. 90, observam-se os menores custos associados ao processo de corte por plasma. Comparando o corte por plasma com o corte por fusão reactiva, é notório o menor custo horário deste último, evidenciando-se o facto de que o corte por plasma é mais económico pelas elevadas velocidades que proporciona.

Na Fig. 91, são resumidos os custos de cada um dos processos por metro de corte linear à velocidade máxima estabilizada.

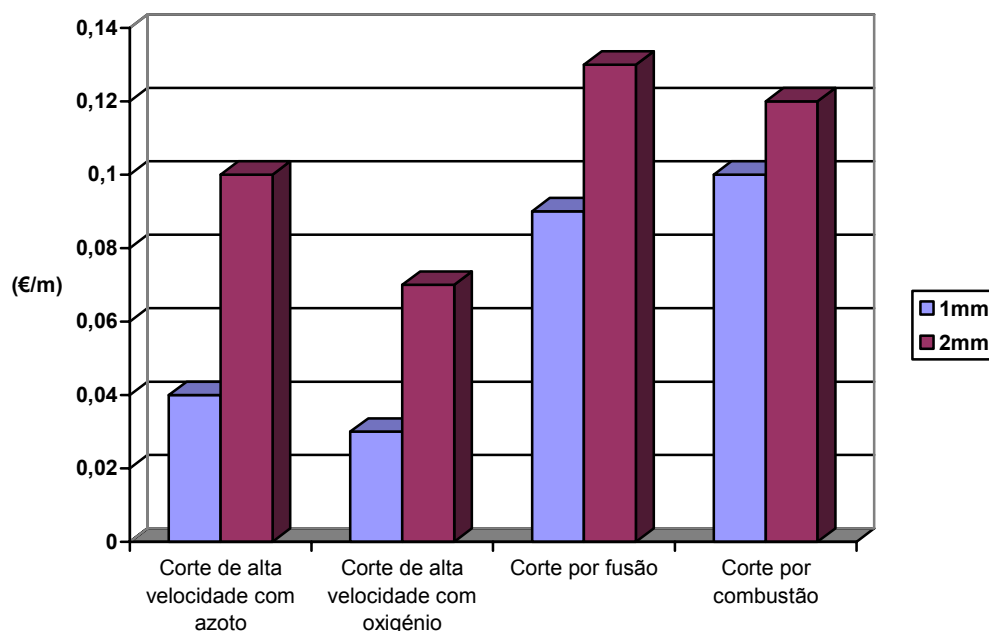


Fig. 91 – Comparativo de custos entre vários processos de corte laser

Da observação da figura, são evidentes os benefícios económicos associados ao corte por plasma, em particular com azoto.

5.2. *Análise económica comparativa entre o corte laser de alta velocidade e outros processos de corte*

Dados actuais recolhidos junto de uma “*laser job-shop*” permitiram estimar o custo horário de corte por jacto de água e por plasma, bem como velocidades de corte de materiais metálicos nas espessuras em estudo.

A Tabela 28 mostra os custos aproximados de processamento por jacto de água.

Material e espessura:	Vel. de Corte (m/min):	Custo por hora (€/hora):	Custo por metro (€/m):
Aço não ligado, 1mm	2	40,00	0,33
Aço não ligado, 2mm	1,2	40,00	0,55
AISI 304, 1mm	1,9	40,00	0,35
AISI 304, 2mm	1	40,00	0,67
Alumínio, 1mm	5,1	40,00	0,13
Alumínio, 2mm	3	40,00	0,22

Tabela 28 – Custos de processamento no corte por jacto de água

A Tabela 29 apresenta custos aproximados do corte por plasma.

Material e espessura:	Vel. de Corte (m/min):	Corrente (A)	Custo por hora (€/hora):	Custo por metro (€/m):
Aço não ligado, 1mm	3,6	30	35,00	0,16
Aço não ligado, 2mm	1,5	30	35,00	0,38
AISI 304, 1mm	5,7	45	40,00	0,12
AISI 304, 2mm	3	45	40,00	0,22
Alumínio, 1mm	5,1	45	40,00	0,13
Alumínio, 2mm	3	45	40,00	0,16

Tabela 29 – Custos de processamento no corte por plasma

A Fig. 92 apresenta os custos comparativos entre o corte de alta velocidade, o corte por plasma e o corte por jacto de água.

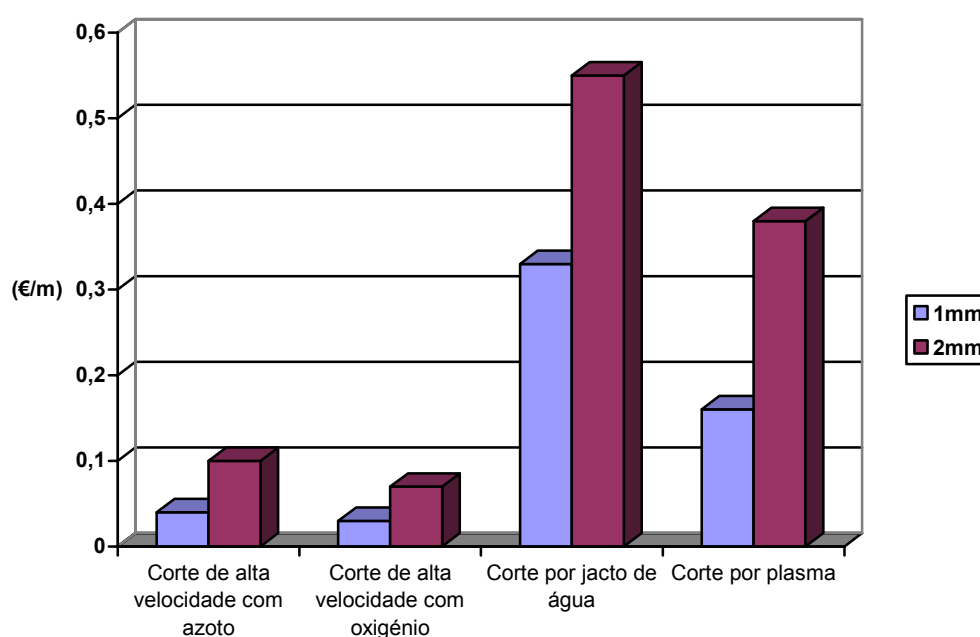


Fig. 92 – Comparativo de custos entre vários processos de corte

Da observação da figura, conclui-se que o custo do corte laser de alta velocidade é aproximadamente 12% do custo de corte por jacto de água e 25% do custo do corte por plasma, para o caso do aço não ligado cortado com azoto.

6. Capítulo VI – Conclusões finais e sugestões para trabalho futuro

Os resultados deste trabalho permitem concluir que existe actualmente um elevado potencial para permitir o uso do corte laser de alta velocidade em condições industriais. Em especial o corte de alumínio com oxigénio parece muito promissor, sendo a principal limitação imposta pela capacidade de resposta do eixo Z em acompanhar as ondulações da chapa. Daqui surge a necessidade do desenvolvimento de um sistema capaz de avaliar a ondulação da chapa e, em função desta, actuar sobre a velocidade de corte para que o eixo vertical possa acompanhar as ondulações da chapa de forma mais eficaz.

Realizaram-se ensaios de corte laser de alta velocidade em aço não ligado, aço inoxidável e alumínio, em espessuras de 1 e 2 mm, usando oxigénio, azoto e árgon como gases de assistência variando ainda a posição do ponto focal e a velocidade de corte.

Mediu-se a irradiância do plasma formado na zona de interacção através de um sensor incorporado na cabeça de corte e correlacionou-se a irradiância do plasma com a velocidade de corte e com a qualidade das superfícies de corte obtidas.

1. Verificou-se que para uma gama bem definida de velocidades de corte, é possível estabelecer uma correlação empírica entre a irradiância do plasma formado e a qualidade da superfície obtida, no corte de alta velocidade com azoto. Nessas condições, foi possível determinar um valor óptimo para a irradiância, acima do qual o corte se deteriora até ao colapso do processo. No corte de alta velocidade de aço não ligado com oxigénio, a reacção exotérmica impediu o estabelecimento de uma correlação válida entre a irradiância do plasma e a qualidade da superfície de corte.
2. Dos cortes efectuados, foi possível concluir que:
 - a. a velocidade máxima de corte verificada foi de 50 m/min, obtida no corte de alumínio de 1mm;
 - b. a formação de plasma depende da velocidade de corte e a sensibilidade à variação de velocidade depende do gás de assistência e da posição do ponto focal;

- c. existe um nível óptimo de irradiância do plasma, acima e abaixo do qual o corte se deteriora até à sua extinção;
 - d. o corte de alta velocidade com azoto implica um ganho importante na eficiência do processo de corte, em todos os materiais, face ao processo convencional de corte por fusão. Por outro lado, o corte de alta velocidade com oxigénio, no caso do aço não ligado, prejudica a eficiência do processo;
 - e. no corte de alta velocidade com azoto, a superfície de corte apresenta-se limpa, isenta de óxidos. A rugosidade da superfície aumenta com o aumento da velocidade e com o aumento da espessura;
 - f. no corte de alta velocidade de aço não ligado com oxigénio, o aspecto da superfície de corte depende fortemente da pressão. Assim, observou-se a presença de óxidos para uma pressão de 5 bar e turbulência para uma pressão de 8 bar;
3. Embora a olho nu sejam visíveis diferenças na qualidade da superfície de corte para combinações material/espessura/gás, a nível macroscópico, não se distinguem mecanismos diferentes e os valores de rugosidade são sempre inferiores aos indicados na norma DIN EN ISO 9013:2000;

A medição da irradiância do plasma pode ser usada como uma variável de controlo de processo. Os diferentes níveis de irradiância observados para diferentes posições do ponto focal, permitem concluir que é possível desenvolver um sistema automático de adaptação do ponto focal em função do nível de irradiância medido.

Não foi possível distinguir neste trabalho a influência do plasma e da reacção exotérmica isoladamente no corte de alta velocidade com oxigénio. Também não foi encontrada literatura sobre este tema específico pelo que se lança a sugestão do desenvolvimento de um trabalho que estude esta questão.

O plasma formado no corte com árgon apresentou características diferentes dos restantes. A análise por espectrometria do plasma permitiria investigar a natureza do plasma formado e correlacioná-la com o nível de irradiância do plasma e as condições de corte. Este estudo está fora do âmbito do presente trabalho, mas dada a sua importância sugere-se que seja alvo de um futuro trabalho de investigação.

7. Anexos

7.1. *Listagem dos programas executados*

```
N10 EXTERN MACHINE_ON (INT)
N11 EXTERN MACHINE_OFF (INT)
N12 EXTERN LASER_ON (INT)
N13 EXTERN LASER_OFF (INT)
N14 EXTERN LASER_STARTP (INT)
N15 EXTERN ORIGEM (INT,INT)
N16 EXTERN TRANSF (INT,INT)
N17 ; CHAPA : 100X140X1 MATERIAL : ST_37
N18 ; ORDEM : (Teste_chapa_fina)
N19 INIT_VAR
N20 AL0100_05_N2_P
N21 MACHINE_ON(0)
N22 ;ORIGEM(100,140)
N23 TRANSF (PX,PY)
N24 G53G00Z95
N25 ;GOTOF "PZ"<<PZ
N26 PZ1:PZ="1";PECA=Prov_ensaio SUB_1 pz1
N27 TRANS X=7.495 Y=5.685

R46=30000
R47=40000
R48=50000
R49=60000

R66=-2
R67=-1.5
R68=-1

N28 REPEAT SUB_1 END
N29 END_VAR
N30 G53G00Z95
N31 MACHINE_OFF(0)
N32 M30

N1000 ;PECA=Prov_ensaio
N1001 SUB_1:
N1002 SUB1_1:SUB="1_1"; (Prov_ensaio) pz1 Cont=1
N1003 G00Z40
N1004 G00X45.034Y5.617F280000
N1005 LASER_STARTP(1)

$AA_SCTRACE[Y1]=1
$AA_SCTRACE[Z1]=1
FOCO_G=R66
HP1_5GERAL

N1006 LASER_ON(1)
N1007 G01X45.005Y7.522
N1008 Y206.815F=R46
G4F.5
N1009 Y406.815F=R47
```

G4F.5
N1010 X55.005F=R46
G4F.5
N1011 Y206.815F=R48
G4F.5
N1012 Y6.815F=R49
G4F.5
N1013 X45.713F=R46
N1014 LASER_OFF(0)
N1015 SUB1_2:SUB="1_2"; (Prov_ensaio) pz1 Cont=2
N1016 G00Z40
N1017 G01X24.979Y5.154F280000
N1018 LASER_STARTP(1)

FOCO_G=R67
HP1_5GERAL

N1019 LASER_ON(1)
N1020 G01X25.005Y7.522
N1021 Y206.815F=R46
G4F.5
N1022 Y406.815F=R47
G4F.5
N1023 X35.005F=R46
G4F.5
N1024 Y206.815F=R48
G4F.5
N1025 Y6.815F=R49
G4F.5
N1026 X25.713F=R46
N1027 LASER_OFF(0)
N1028 SUB1_3:SUB="1_3"; (Prov_ensaio) pz1 Cont=3
N1029 G00Z40
N1030 G01X5.022Y5.485F280000
N1031 LASER_STARTP(1)

FOCO_G=R68
HP1_5GERAL

N1032 LASER_ON(1)
N1033 G01X5.005Y7.522
N1034 Y206.815F=R46
G4F.5
N1035 Y406.815F=R47
G4F.5
N1036 X15.005F=R46
G4F.5
N1037 Y206.815F=R48
G4F.5
N1038 Y6.815F=R49
G4F.5
N1039 X5.713F=R46
G4F.5
N1040 LASER_OFF(0)
N1041 SUB1_4:SUB="1_4"; (Prov_ensaio) pz1 Cont=4
N1042 G00Z40
N1043 G01X0Y0F280000
VEL_C[1]=20000
N1044 LASER_STARTP(1)
N1045 LASER_ON(1)
N1046 G01X0.005Y2.522

N1047 Y411.815
N1048 X60.005
N1049 Y1.815
N1050 X0.713

\$AA_SCTRACE[Y1]=0
\$AA_SCTRACE[Z1]=0

N1051 LASER_OFF(0)
N1052 END:

8. Referências

- [1] K. U. Preißig, D. Petring and G. Herziger, *High Speed Laser Cutting of Thin Metal Sheets*, Proceedings of SPIE, vol. 2207, (1994), p 96-110
- [2] H. K. Tönshoff, A. Ostendorf and B. Thiessen, *Controlled CO₂ Laser Cutting on the Border to Beginning of Plasma*, Commercial and Biomedical Applications of Ultrashort Pulse lasers; Laser Plasma Generation and Diagnostics, Proceedings of SPIE, vol. 4276, (2001), p 80-89
- [3] K. Kincade and S. G. Anderson, *Laser Marketplace 2006 - "Market's messages are mixed"*, Laser Focus World, vol. 42, nº 1, (2006), p.78-93
- [4] R. V. Steele, *Laser Marketplace 2006 - "Diode doldrums"*, Laser Focus World, vol. 42, nº 2, (2006), p.69-78
- [5] R. J. Hull and M. L. Lander, *Experiments in laser cutting of thick steel sections using a 100 kW CO₂ laser*, Laser Materials Processing, ICALEO, vol. 89, (2000), p 78-86
- [6] *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*, ed. Rofin Sinar, Hamburg, (2000)
- [7] *Combined Research and Curriculum Development: Nontraditional Manufacturing - Laser Machining Processes*, The FU Foundation School of Engineering and Applied Science, Columbia University, (2000)
- [8] W. M. Steen, *Laser Material Processing*, ed. Springer-Verlag, London, (2003)
- [9] H. Bitzel, J. Borchardt, J. Muller, F. Neidhart, K. Parey, A. Rau, S. Riecke, A. Schmid, G. Trentmann, G. Vorlander and K. Zimmermann, *The Fascinating World of Sheet Metal*, ed. Trumpf GmbH + Co., Ditzingen, (1996)
- [10] G. Markillie, J. Deile and H. Schlueter, *Novel design approach benefits CO₂ laser users*, <http://www.laserfocusworld.com> (disponível on-line), (2003)
- [11] J. F. O. Santos, L. Quintino and R. M. Miranda, *Corte por laser*, ed. Instituto de Soldadura e Qualidade, (1993)
- [12] *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*, ed. Rofin Sinar, Hamburg, (2004)
- [13] D. Havrilla, *Disk Lasers - YAG is redefined through the diode-pumped disk laser*, Laser Focus World, vol. 41, nº (2005), p.102-106
- [14] R. Poprawe and W. Schulz, *Development and application of new high-power laser beam sources*, www.ilt.fraunhofer.de/ilt (disponível on-line), (2002)

- [15] A. Costa, L. Quintino and R. Miranda, *Lasers de Fibras - Estado da Arte*, Tecnologia e Qualidade, vol. 53, nº (2005), p.13-16
- [16] J. Hecht, *PHOTONIC FRONTIERS: HIGH POWER FIBER LASERS: Pumping up the power*, Laser Focus World, vol. 41, nº (2005), p.66-70
- [17] B. Shiner, *Fiber Lasers for Material Processing*, ed. Laser Institute of America, (2004)
- [18] B. Shiner, *High Power Fiber Lasers Impact Material Processing*, <http://ils.pennnet.com> (disponível on-line), (2003)
- [19] <http://www.ipgphotonics.com>
- [20] A. Knitsch, A. Luft, T. Groß, D. Ristau, P. Loosen and R. Poprawe, *Diode laser modules of highest brilliance for materials processing*, Proceedings of SPIE, vol. 4651, (2002), p 256-263
- [21] J. Marius-Christian, *Process for quality control of laser beam welding and cutting*, EUA, United States Patent, No. US5272312, (1990)
- [22] A. Robledo-MarTinez, H. Sobral and M. Villagrán-Muniz, *Measurement of the electrical size of a laser-induced plasma in a uniform field*, Applied Surface Science, vol. 248, (2005), p.32-35
- [23] X. Zhang, W. Chen, P. Jiang, J. Guo and Z. Tian, *Modeling and application of plasma charge current in deep penetration laser welding*, Journal of Applied Physics, vol. 93, (2003), p.8842-8847
- [24] H. C. Tse, H. C. Man and T. M. Yue, *Effect of magnetic field on plasma control during CO2 laser welding*, Optics and Lasers Technology, vol. 31, (1999), p.363-368
- [25] Y. Peng, W. Chen, C. Wang, G. Bao and Z. Tian, *Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 34, (2001), p.3145-3149
- [26] Z. Szymanski, J. Hoffman and J. Kurzyna, *Plasma plume oscillations during welding of thin metal sheets with a CW CO2 laser*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 34, (2000), p.189-199
- [27] C. L. Caristan, *Laser cutting - Guide for Manufacturing*, ed. Society of Manufacturing Engineers, Association for Forming & Fabricating Technologies of SME, Dearborn Michigan, (2004)
- [28] V. Semak and A. Matsunawa, *The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 30, (1997), p.2541-2552

- [29] L. J. Radziemski and D. A. Cremers, *Laser Induced Plasmas and Applications*, ed. Marcel Dekker, Inc., New York, (1989)
- [30] H. Horisawa, M. Tamura and S. Kimura, *Plasma Behaviors in Laser Cutting*, First International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Proceedings of SPIE, vol. 4088, (2000), p 280-283
- [31] H. Horisawa, H. Ashizawa and N. Yasunaga, *Plasma Characterization in Laser Cutting*, Proceedings of SPIE, vol. 3888, (2000), p 82-89
- [32] S. Soubacq, P. Pignolet, E. Schall and J. Batina, *Investigation of a gas breakdown process in a laser-plasma experiment*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 37, (2004), p.2686-2702
- [33] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/IonEnergy/tblNew.html>
- [34] Y. Zhang, L. Li and G. Zhang, *Spectroscopic measurements of plasma inside the keyhole in deep penetration laser welding*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, (2005), p.703-710
- [35] Z. Szymanski, J. Kurzyna and W. Kalita, *The spectroscopy of the plasma plume induced during laser welding of stainless steel and titanium*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 30, (1997), p.3153-3162
- [36] R. Jaschek, P. Konrad, R. Mayerhofer, H. W. Bergmann, P. Bickel, R. Kowalewicz, A. Kuttenger and J. Christiansen, *Contribution to the beam plasma-material-interactions during material processing with TEA-CO₂-laser-radiation*, Proceedings of SPIE, vol. 2502, (1995), p 724-731
- [37] B. Y. Man, *Particle velocity, electron temperature, and density profiles of pulsed laser-induced plasmas in air at different ambient pressures*, Applied Physics B, vol. 67, (1998), p.241-245
- [38] M. Althaus and M. Hugenschmidt, *Laser-induced plasmas examined by means of quasi-cinematographic methods*, Proceedings of SPIE, vol. 2502, (1995), p 732-736
- [39] E. Haug and W. Nakel, *The Elementary Process of Bremsstrahlung*, ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, (2004)
- [40] Fang-YuYueh, J. P. Singh and H. Zhan, *Laser-induced Breakdown Spectroscopy, Elemental Analysis*, Encyclopedia of Analytical Chemistry, (2000), p. 2066-2087
- [41] M. v. d. Sande, *Laser scattering on low temperature plasmas - high resolution and stray light rejection*, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, (2002)
- [42] X. Chen and H. X. Wang, *Prediction of the laser induced plasma characteristics in laser welding: a new modelling approach including a simplified keyhole model*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 36, (2003), p.1634-1643

- [43] U. Bielesch, M. Napp, J. H. Schafer and J. Uhlenbusch, *Control of the surface plasma during pulsed laser cutting*, Proceedings of SPIE, vol. 3092, (1997), p 631-634
- [44] H. Sobral, M. Villagrán-Muniz, R. Navarro-González and A. C. Raga, *Temporal evolution of the shock wave and hot core air in laser induced plasma*, Applied Physics Letters, vol. 77, (2000), p.3158-3160
- [45] T. Zuo, R. Xiao and R. Volz, *Experimental research on the influence of laser-induced plasma on the beam focusing during high-power CO2 laser materials processing*, Proceedings of SPIE, vol. 3268, (1998), p 62-69
- [46] B. S. Yilbas and Z. Yilbas, *Measurement of laser beam transmittance through laser produced vapour plume*, Optical and Quantum Electronics, vol. 33, (2001), p.621-640
- [47] V. V. Semak, B. Damkroger and S. Kempka, *Temporal evolution of the temperature field in the beam interaction zone during laser material processing*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 32, (1999), p.1819-1825
- [48] H.-X. Wang and X. Chen, *Three dimensional modelling of the laser-induced plasma plume characteristics in laser welding*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 36, (2003), p.628-639
- [49] D. Appelt, *Novas Tecnologias de Corte*, ed. Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica, (1991)
- [50] G. Chryssolouris, *Laser Machining - Theory and Practice*, ed. Springer Verlag, New York, (1991)
- [51] *Catálogo de chapa DOMEX*, SSAB Tunnplat AB, (2004)
- [52] *Catálogo de chapa RACOLD LASER*, Rautaruukki Steel, (2004)
- [53] *Catálogo de chapa RAEX LASER*, Rautaruukki Steel, (2004)
- [54] D. Havrilla and P. Anthony, *Laser cutting process fundamentals and troubleshooting guideline*, ed. Rofin Sinar, Inc., Hamburg, (1999)
- [55] *Les procecedes de coupage thermique - la découpe laser*, ed. Air Liquide, (1993)
- [56] C. Karatas, O. Keles, I. Uslan and Y. Usta, *Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 172, (2005), p.22-29
- [57] *Relatório interno de testes de corte na máquina de corte por laser modelo CCL 3015*, Adira, (2005)
- [58] D. J. Scatena and G. L. Herriot, *How to avoid contamination problems in CO2 laser optics*, ed. II-VI, Saxonburg, (1990)

- [59] Man, H C, *Analysis of the dynamic characteristics of gas flow inside a laser cut kerf under high cut-assist gas pressure*, Journal of physics. D, applied physics, vol. 32, (1999), p.1469-1477
- [60] C. Kai, Chen, *Gas Jet-Workpiece Interactions in Laser Machining.*, Journal of manufacturing science and engineering, vol. 122, (2000), p.429
- [61] S.-L. Chen, *The effects of high-pressure assistant-gas flow on high power CO2 laser cutting*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 88, (1997), p.57-66
- [62] K. Berthold and S. Bert, *Method and sensor device for monitoring a laser machining operation to be performed on a work piece as well as laser machining head with a sensor device of the kind*, EUA, United States Patent Application Publication, No. US6621047, (2002)
- [63] K. Berthold and S. Bert, Precitec KG, *Method and sensor device for monitoring a laser machining operation to be performed on a work piece as well as laser machining head with a sensor device of the kind*, EUA, United States Patent Application Publication, No. US2004026389, (2004)
- [64] R. Fabbro, D. Bermejo, J. M. Orza, L. Sabatier, L. Leprince and V. Granier, *Absorption measurements in continuous high-power CO2 laser processing of materials*, CO2 Lasers and Applications II, Proceedings of SPIE, vol. 1276, (1990), p 461-467
- [65] W. W. Duley, *Laser Welding*, ed. John Wiley & Sons, Inc., (1998)
- [66] B. S. Yilbas and A. Z. Sahin, *Oxygen assisted laser cutting mechanism--a laminar boundary layer approach including the combustion process*, Optics & Laser Technology, vol. 27, (1995), p.175-184
- [67] B. S. Yilbas, *A study into CO2 laser cutting process*, Heat and Mass Transfer, vol. 32, (1997), p.175-180
- [68] B. S. Yilbas, *Experimental investigation into CO2 laser cutting parameters*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 58, (1996), p.323-330
- [69] *Estudo interno de custos operatórios estimados da máquina de corte por laser modelo CCL 3015*, Adira, (2003)